

UNIVERSIDAD DE CUENCA



Facultad de Ciencias Químicas

Carrera de Ingeniería Química

“Estudio de columnas de lecho fijo para la eliminación de Ciprofloxacina y Sulfametoxazol de soluciones acuosas utilizando residuos vegetales.”

Trabajo de titulación previo a la obtención del título de Ingeniero Químico.

Autores:

Fredy Laudelino Encalada Narvaez

C.I. 0302947460

Javier Eduardo Matute Ochoa

C.I. 0105762181

Tutora:

Ing. María Eulalia Peñafiel Tenorio, Mgt.

C.I. 0102608197

Cuenca-Ecuador

27/Septiembre/2019



RESUMEN

En el presente proyecto se realizó el estudio de adsorción de dos fármacos, Ciprofloxacina y Sulfametoxazol en soluciones acuosas, utilizando columnas de lecho fijo a escala de laboratorio, los biosorbentes utilizados fueron bagazo de caña de azúcar y residuos de mazorca de maíz. En las pruebas de adsorción con bagazo de caña se estudiaron parámetros como caudal de alimentación a la entrada de la columna, altura del lecho en las columnas y concentración inicial del fármaco en las soluciones, para lo cual se mantuvieron parámetros constantes como la temperatura y pH. Mediante la construcción de las curvas de ruptura de cada fármaco se estudiaron los efectos de cada parámetro. Se encontró que el caudal de alimentación, la altura del lecho y la concentración inicial tienen influencia en el tiempo en el que se presenta el punto de ruptura de la curva como también el punto de saturación de la misma. Posteriormente se buscó replicar el proceso de adsorción de lecho fijo en una columna de diámetro superior a escala de laboratorio (escalado), para dicha replica se tomaron en cuenta parámetros como la similitud geométrica al mantener constante la relación entre altura y diámetro, propiedades físicas del lecho y similitud Cinemática y Dinámica del fluido, donde se obtuvo resultados similares entre ambas columnas. La curva de ruptura fue ajustada a diferentes modelos matemáticos, la adsorción de Ciprofloxacina y Sulfametoxazol sobre bagazo de caña de azúcar tuvo un buen ajuste con el modelo de Yoon-Nelson. El estudio de la variación de los parámetros muestra que al aumentar el caudal de alimentación disminuye el punto de ruptura, al aumentar la altura del lecho aumenta el punto de ruptura y al aumentar la concentración disminuye el punto de ruptura. Los resultados indican que el proceso de adsorción del fármaco Ciprofloxacina se adsorbe mejor en Mazorca de maíz, teniendo una capacidad de adsorción para el Bagazo de Caña de 0,727 mg/g y para la Mazorca de Maíz de 1,245 mg/g. El fármaco Sulfametoxazol se adsorbe mejor en Bagazo de Caña, la capacidad de adsorción para la Mazorca de Maíz fue 0,004 mg/g y para el Bagazo de caña 0,019 mg/g.

Palabras claves: Biosorción. Ciprofloxacina. Sulfametoxazol. Bagazo de caña. Mazorca de maíz. Remoción. Tratamientos. Contaminante.



ABSTRACT

In the present project, the study of adsorption of two drugs, Ciprofloxacin and Sulfamethoxazole in aqueous solutions, was carried out using laboratory bed columns, the biosorbents used were sugarcane bagasse and corn cob residues. In adsorption tests with cane bagasse, parameters such as feed flow at the entrance of the column, bed height in the columns and initial concentration of the drug in the solutions were studied, for which constant parameters such as temperature and pH were maintained. Through the construction of the rupture curves of each drug, the effects of each parameter were studied. It was found that the feed rate, bed height and initial concentration have an influence on the time at which the breakpoint of the curve is presented as well as the saturation point of the curve. Subsequently, it was sought to replicate the fixed bed adsorption process in a column with a diameter greater than a laboratory scale (scaling), for such replication, parameters such as geometric similarity will be taken into account by maintaining constant the relationship between height and diameter, physical properties of the Bed and similarity Kinematics and Dynamics of the fluid, where similar results are obtained between both columns. The rupture curve was adjusted to different mathematical models, the adsorption of Ciprofloxacin and Sulfamethoxazole on the sugarcane bagasse had a good fit with the Yoon-Nelson model. The study of the variation of the parameters shows that the modified feed rate increases the breaking point, the bed height increases the breaking point increases and the modified concentration the breaking point increases. The results indicate that the adsorption process of the drug Ciprofloxacin is best adsorbed in corncob, having an adsorption capacity for cane bagasse of 0.727 mg / g and for corncob of 1,245 mg / g. The drug Sulfamethoxazole is best adsorbed in Cane Bagasse, the adsorption capacity for Corncob was 0.004 mg / g and for Cane Bagasse 0.019 mg / g.

Keywords: Biosorption. Ciprofloxacin. Sulfamethoxazole. Cane bagasse. Maize cob. Removal. Treatments. Contaminant.



Contenido

RESUMEN	2
ABSTRACT	3
Índice de Tablas.....	8
Índice de figuras.....	10
DEDICATORIA.....	16
AGRADECIMIENTOS	17
INTRODUCCIÓN	18
OBJETIVOS.....	20
CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO.....	21
1.1 Antecedentes	21
1.2 Contaminante Emergente	22
1.3 Tipos de contaminantes emergentes en el agua	22
1.3.1 Pesticidas	22
1.3.2 Productos farmacéuticos	22
Ciprofloxacina.....	23
Sulfametoxazol	24
1.4 Técnicas de remoción de fármacos	24
1.5 Adsorción	26
1.5.1 Naturaleza de los adsorbentes	26
1.6 Biosorción	26
1.6.1 Mecanismos de biosorción	27
1.6.2 Biosorbentes	28
1.6.3 Características del biosorbente	28
1.6.4 Propiedades de la disolución.....	30
1.6.5 Operación.....	30



1.7	Adsorción en columnas de lecho fijo.....	31
1.8	Espectroscopia visible UV.....	33
1.9	Curva de ruptura	33
1.10	Modelado de columnas de lecho fijo.....	34
1.10.1	Modelo de Thomas	35
1.10.2	Modelo Yoon-Nelson.....	35
1.11	Criterios de escalado	36
CAPÍTULO II: METODOLOGÍA.....		38
2.1	Biosorbentes.....	38
2.1.1	Preparación de los biosorbentes.....	38
2.2	Preparación de las soluciones acuosas	39
2.2.1.	Preparación de las soluciones de fármacos.....	40
2.2.2.	Preparación del blanco	40
2.3	Estudio del proceso de biosorción en columnas de lecho fijo.....	40
2.3.1	Montaje experimental.....	41
2.3.1.1.	Columnas 1	41
2.3.1.2.	Columnas 2.....	42
2.3.2	Estudios de escalado	43
2.3.3	Estudios hidrodinámicos	44
2.3.4	Estudios de concentración	45
2.3.5	Estudio de remoción	45
2.3.6	Estudio del comportamiento del proceso de biosorción en columna	46
2.4	Modelado matemático del proceso de biosorción en columnas de lecho fijo	47



2.4.1	Modelo de Thomas.....	47
2.4.2	Modelo Yoon-Nelson.....	47
2.5	Análisis estadístico	47
2.6	Disposición de los residuos generados	48
CAPÍTULO III: RESULTADOS		49
3.1	Biosorción en columnas.....	49
3.1.1	Estudio en columnas de lecho fijo con bagazo de caña como biosorbente	49
3.1.2	Estudio de la remoción de Ciprofloxacina	49
3.1.2.1	Estudio del efecto del caudal	49
3.1.2.2	Estudio del efecto de la altura	52
3.1.2.3	Estudio del efecto de la concentración.....	55
3.1.3	Estudio de la remoción de Sulfametoxazol	57
3.1.3.1	Estudio del efecto del caudal	57
3.1.3.2	Estudio del efecto de la altura.....	60
3.1.3.3	Estudio del efecto de la concentración.....	62
3.2	Criterios de escalado	65
3.2.1	Escalado en columnas con bagazo de caña.....	65
3.2.1.1	Escalado empleando el fármaco Ciprofloxacina	65
3.2.1.2	Escalado empleando el fármaco Sulfametoxazol.....	69
3.3	Estudio comparativo de la biosorción de Ciprofloxacina y Sulfametoxazol utilizando Bagazo de Caña como Biosorbente	73
3.4	Estudio comparativo de Biosorbentes Bagazo de caña y Mazorca de Maíz al adsorber Ciprofloxacina y Sulfametoxazol	75



UNIVERSIDAD DE CUENCA

3.4.1 Comparación al utilizar Ciprofloxacina (CPX)	75
3.4.2 Comparación al utilizar Sulfametoxazol (SMX)	77
Conclusiones	79
Recomendaciones:	80
Bibliografía	81



Índice de Tablas

Tabla 1: Estudios hidrodinámicos para las distintas columnas	45
Tabla 2: Simbología de las variables del proceso.....	49
Tabla 3: Estudio del efecto del caudal en columnas de lecho fijo Q1) Caudal 1 Q2) Caudal 2.....	50
Tabla 4: Parámetros de las curvas de ruptura con variación de caudal para la adsorción de Ciprofloxacina con bagazo de caña como biosorbente.....	51
Tabla 5: Constantes de los modelos matemáticos empleados en el estudio del caudal ...	52
Tabla 6: Estudio del efecto de la altura en columnas de lecho fijo h1) Altura 1 h2) Altura 2	52
Tabla 7: Parámetros de las curvas de ruptura con variación de altura para la adsorción de Ciprofloxacina con bagazo de caña como biosorbente.....	54
Tabla 8: Constantes de los modelos matemáticos empleados en el estudio de la altura ..	55
Tabla 9: Estudio del efecto de la concentración en columnas de lecho fijo Co1) Concentración inicial 1 Co2) Concentración inicial 2	55
Tabla 10: Parámetros de las curvas de ruptura con variación de concentración para la adsorción de Ciprofloxacina con bagazo de caña como biosorbente	56
Tabla 11: Constantes de los modelos matemáticos empleados en el estudio de la concentración.....	57
Tabla 12: Estudio del efecto del caudal en columnas de lecho fijo Q1) Caudal 1 Q2) Caudal 2.....	58
Tabla 13: Parámetros de las curvas de ruptura con variación de caudales para la adsorción de Sulfametoxazol con bagazo de caña como biosorbente:.....	59
Tabla 14 Constantes de los modelos matemáticos empleados en el estudio de la influencia del caudal para Sulfametoxazol.....	60
Tabla 15: Estudio del efecto de la altura en columnas de lecho fijo h1) Altura 1 h2) Altura 2	60
Tabla 16: Parámetros de las curvas de ruptura con variación de alturas para la adsorción de Sulfametoxazol con bagazo de caña como biosorbente:	61
Tabla 17 Constantes de los modelos matemáticos empleados en el estudio de la altura del lecho para Sulfametoxazol	62



Tabla 18: Estudio del efecto de la concentración en columnas de lecho fijo Co1) Concentración inicial 1 Co2) Concentración inicial 2	63
Tabla 19: Parámetros de las curvas de ruptura con variación de concentraciones para la adsorción de Sulfametoxazol con bagazo de caña como biosorbente.....	64
Tabla 20 Constantes de los modelos matemáticos empleados en el estudio de la concentración para Sulfametoxazol.....	65
Tabla 21: Condiciones de escalado para las columnas con Ciprofloxacina 10 ppm	65
Tabla 22: Parámetros de las curvas de ruptura en el escalado para la adsorción de Ciprofloxacina con bagazo de caña como biosorbente.....	67
Tabla 23: Condiciones de escalado para las columnas con Sulfametoxazol 10 ppm.....	69
Tabla 24: Parámetros de las curvas de ruptura en el escalado para la adsorción de Sulfametoxazol con bagazo de caña como biosorbente	71
Tabla 25 Condiciones de las curvas de ruptura para la comparación de la adsorción entre CPX y SMX	73
Tabla 26 Parámetros obtenidos de la curva de ruptura de la comparativa de adsorción entre CPX y SMX	75
Tabla 27: Condiciones de la curva de ruptura para la comparativa de biosorbentes para CPX	75
Tabla 28 Parámetros obtenidos de las curvas de ruptura pertenecientes a la comparación de Biosorbentes para CPX	76
Tabla 29 Condiciones de la Curva de ruptura para la comparativa de Biosorbentes para SMX	77
Tabla 30 Parámetros obtenidos de las curvas de ruptura pertenecientes a la comparación de Biosorbentes para SMX.....	78



Índice de figuras

Figura 1: Estructura de la Ciprofloxacina	24
Figura 2: Estructura del sulfametoxazol	24
Figura 3: Columna de adsorción	32
Figura 4: Ejemplo de curva de ruptura	34
Figura 5: Montaje experimental	41
Figura 6: Buretas con bagazo de caña	42
Figura 7: Columnas de lecho fijo con bagazo de caña	43
Figura 8: Comparación de caudales de alimentación en un sistema mono-componente para el bagazo de caña Q1) Caudal 1 Q2) Caudal 2	50
Figura 9: Curva experimental (Q1 2,5 ml/min) vs modelos matemáticos	51
Figura 10: Comparación de las distintas alturas de biosorbente para el bagazo de caña	53
Figura 11: Curva experimental (h2 6cm) vs modelos matemáticos	54
Figura 12: Comparación de las distintas concentraciones en un sistema mono-componente para el bagazo de caña	56
Figura 13: Curva experimental (Co1 9 ppm) vs modelos matemáticos	57
Figura 14: Comparación de caudales de alimentación para el bagazo de caña	58
Figura 15: Curva experimental (Q1 1,5 ml/min) vs modelos matemáticos	59
Figura 16: Comparación de alturas en un sistema mono-componente para el bagazo de caña	61
Figura 17: Curva experimental (h1 16cm) vs modelo matemático de Yoon Nelson	62
Figura 18: Comparación de concentraciones en un sistema mono-componente para el bagazo de caña	63
Figura 19: Curva experimental (Co2 11 ppm) vs modelo matemático de Yoon Nelson	64
Figura 20: Comparación de las columnas en un sistema mono-componente para el bagazo de caña a) Prueba 1 b) Prueba 2	66
Figura 21: Comparación de escalado empleando los modelos matemáticos en un sistema mono-componente para el bagazo de caña a) Prueba 1 b) Prueba 2	68
Figura 22: Comparación de las columnas en un sistema mono-componente para el bagazo de caña a) Escalado 1 b) Escalado 2	70
Figura 23: Comparación de escalado empleando el modelo matemático Yoon Nelson en un sistema mono-componente para el bagazo de caña	72



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Figura 24 Curvas de ruptura de la comparación de la adsorción de los fármacos CPX y SMX al usar Bagazo de Caña como biosorbente	74
Figura 25 Curvas de ruptura de la comparación de Biosorbentes para CPX	76
Figura 26 Curvas de ruptura de la comparación de Biosorbentes para SMX.....	78



Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Fredy Laudelino Encalada Narvaez en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación “Estudio de columnas de lecho fijo para la eliminación de Ciprofloxacina y Sulfametoxazol de soluciones acuosas utilizando residuos vegetales”, de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 27 de Septiembre de 2019

Fredy Laudelino Encalada Narvaez

C.I: 0302947460



Cláusula de licencia y autorización para publicación en el Repositorio Institucional

Javier Eduardo Matute Ochoa en calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales del trabajo de titulación “Estudio de columnas de lecho fijo para la eliminación de Ciprofloxacina y Sulfametoxazol de soluciones acuosas utilizando residuos vegetales”, de conformidad con el Art. 114 del CÓDIGO ORGÁNICO DE LA ECONOMÍA SOCIAL DE LOS CONOCIMIENTOS, CREATIVIDAD E INNOVACIÓN reconozco a favor de la Universidad de Cuenca una licencia gratuita, intransferible y no exclusiva para el uso no comercial de la obra, con fines estrictamente académicos.

Asimismo, autorizo a la Universidad de Cuenca para que realice la publicación de este trabajo de titulación en el repositorio institucional, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Cuenca, 27 de Septiembre de 2019

Javier Eduardo Matute Ochoa

C.I: 0105762181



Cláusula de Propiedad Intelectual

Fredy Laudelino Encalada Narvaez, autor del trabajo de titulación “Estudio de columnas de lecho fijo para la eliminación de Ciprofloxacina y Sulfametoxazol de soluciones acuosas utilizando residuos vegetales”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 27 de Septiembre 2019

Fredy Laudelino Encalada Narvaez

C.I: 0302947460



UNIVERSIDAD DE CUENCA

Cláusula de Propiedad Intelectual

Javier Eduardo Matute Ochoa, autor del trabajo de titulación “Estudio de columnas de lecho fijo para la eliminación de Ciprofloxacina y Sulfametoxazol de soluciones acuosas utilizando residuos vegetales”, certifico que todas las ideas, opiniones y contenidos expuestos en la presente investigación son de exclusiva responsabilidad de su autor.

Cuenca, 27 de Septiembre 2019

Javier Eduardo Matute Ochoa

C.I: 0105762181



DEDICATORIA

Este proyecto de investigación va dedicado primero a Dios que sin su voluntad nada sería posible, a mis padres Vicente y Mercedes por su amor y apoyo gracias a ustedes he logrado convertirme en lo que soy. Ha sido el orgullo y privilegio de ser su hijo.

A mis hermanas Nube y Gladys por su cariño y apoyo a lo largo de mi trayecto en la carrera.

A mis mejores amigos Byron, Javier, Juan Patricio, Angélica y Paola por compartir su amistad incondicional.

FREDY

Dedico el presente trabajo, a mis padres Noemi y Julio por brindarme su apoyo en cada paso que doy, gracias a ustedes he logrado convertirme en lo que soy.

A mis hermanos Cristina y Enrique por su cariño y apoyo a lo largo de mi trayecto en la carrera.

A mis abuelos José y Dolores, pues sin su apoyo este logro no hubiese sido posible.

A mis mejores amigos Byron, Fredy, Juan Patricio, Angélica y Paola por compartir su amistad incondicional.

JAVIER



UNIVERSIDAD DE CUENCA

AGRADECIMIENTOS

A la Ing. María Eulalia Peñafiel tutora del presente proyecto quien con su experiencia nos brindó sus conocimientos, su apoyo y guía en la investigación.

Al grupo de personas que conforman el Centro de Estudios Ambientales (CEA), por abrirnos las puertas y apoyarnos en el proyecto.

Finalmente, a todas las personas quienes nos ayudaron de una u otra manera.



INTRODUCCIÓN

La contaminación del agua con los llamados contaminantes emergentes, entre los cuales se encuentran los fármacos, ha sido una preocupación de la comunidad científica en las últimas décadas. Varios estudios han demostrado su presencia en aguas residuales, naturales y hasta en agua potable. (Bueno et al., 2012) Si bien estos contaminantes, se encuentran en concentraciones bajas, se ha demostrado los posibles efectos adversos que estos contaminantes causan en el ambiente y las personas relacionadas al mismo tales como acción tóxica y cancerígena, incidencia en la producción de alimentos, reducción de su utilización industrial o agropecuaria, (Lopez, & Barcelo, 2008), además de la afectación del óptimo funcionamiento de procesos biológicos de tratamiento por los antibióticos y desinfectantes (Tejada & Quiñonez, 2014). Por esto la necesidad de encontrar sistemas de tratamiento que sean capaces de removerlos es una necesidad imperiosa, ya que se ha demostrado hasta ahora, que los sistemas convencionales de tratamiento no son capaces de removerlos.

En el Centro de Estudios Ambientales de la Universidad de Cuenca CEA, se ha realizado estudios del uso de los residuos vegetales como adsorbentes de fármacos y se ha demostrado mediante procesos en batch o por lotes que la biomasa tiene poder adsorbente, sin embargo, para validar el rendimiento de la adsorción se requiere de un proceso en continuo mediante una columna. Además, los sistemas de tratamiento de agua residuales más comunes son las columnas de lecho fijo, que consisten en tubo o columna construida de material plástico o acero que posee un sistema de distribución de flujo en la parte superior y un sistema de drenaje en la parte inferior donde soporta el lecho fijo con el adsorbente. Los lechos empacados se utilizan ampliamente en los procesos de absorción, donde el lecho está cargado con el adsorbente adecuado para la eliminación selectiva de contaminantes en la corriente de aguas residuales (Pachathu, Ponnusamy, & Srinivasan, 2016)

Dentro de los factores más importantes a tener en cuenta en el diseño de estas columnas es el volumen de líquido tratado hasta alcanzar el punto de ruptura, considerando un caudal constante y el tiempo de trabajo. Estos factores dependen fundamentalmente de la capacidad del adsorbente para retener el soluto. La ruptura de la curva en el estudio de la columna proporciona una comprensión fundamental del proceso dinámico y ayuda en el



diseño de una columna empaquetada (Pachathu, Ponnusamy, & Srinivasan, 2016). Experimentos que utilizan una columna de lecho fijo a escala de laboratorio con datos de rendimiento de volumen relativamente grande se pueden usar para diseñar una planta de escala industrial y piloto más grande con un alto grado de precisión (Acheampong, Pakshirajan, Annachhatre, & Lens, 2013).

Para la ampliación de la escala en las columnas de lecho fijo, se toma en cuenta los fenómenos de transferencia de masa y el proceso hidrodinámico de la columna, en donde manteniendo el mismo tipo de columna en diferentes escalas, el parámetro crítico es el tamaño de la columna, que incorpora sus analogías y dimensiones geométricas. Varios métodos pueden ser empleados en el modelado:

Procesos químicos o físicos. Hay tres enfoques básicos en el procedimiento de ampliación (Calero, Hernáinz, & Lara, 2012) (a) “modelado matemático”, (b) “modelado físico” y (c) “ampliación experimental”. El modelado matemático de un proceso es expresar matemáticamente la relación entre las variables del proceso básico y las condiciones de contorno y configurar un algoritmo. El modelado físico consiste en cambiar los distintos parámetros, usando el algoritmo, para verificar si el modelo corresponde al proceso de investigación. Finalmente, en la ampliación experimental se necesita una serie de datos que cubran adecuadamente una amplia gama de las variables operativas más importantes.

En este trabajo se estudió el proceso de adsorción en columna y se evaluó los efectos de ciertos parámetros operacionales con el fin de obtener datos que ayuden a demostrar la capacidad de adsorción de las biomasas y al diseño de las columnas de adsorción.



OBJETIVOS

GENERAL:

Estudiar los parámetros operacionales de columna de lecho fijo para la eliminación de fármacos del agua utilizando bagazo de caña de azúcar y mazorca de maíz.

ESPECÍFICOS:

- Evaluar los efectos del caudal de alimentación y la altura del lecho a la entrada en una columna de lecho fijo empacada con residuos vegetales a escala de laboratorio.
- Evaluar los efectos de las distintas concentraciones a la entrada de la columna de lecho fijo empacada con residuos vegetales a escala de laboratorio
- Desarrollar una ampliación de escala y estudiar el comportamiento de las columnas.



CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO

1.1 Antecedentes

La supervivencia del hombre como especie ha sido gracias al aprovechamiento de los recursos naturales; sin embargo, la falta de planeación y el desconocimiento de las posibles consecuencias de un mal aprovechamiento trajeron consigo la contaminación del ambiente natural. El recurso hídrico el cual es necesario para la vida ha sido fuertemente afectado por sustancias cada vez más agresivas y difíciles de tratar debido a la naturaleza química de sustancias presentes en los desperdicios que caen a las corrientes. Por esta razón, agencias gubernamentales, ambientales, universidades y diversas organizaciones, se han preocupado por evaluar el impacto antrópico sobre los recursos hídricos a partir de un estudio de la naturaleza química, física, y biológica del agua, mediante programas de monitoreo. (Samboni, Carvajal, & Escobar, 2007)

El termino "contaminantes emergentes" (CE) generalmente es utilizado para referirse a compuestos de diferente origen y naturaleza química, cuya presencia en el medio ambiente no se considera significativa en términos de distribución y/o concentración, es por ello que pasan inadvertidos; sin embargo; actualmente están siendo ampliamente detectados, teniendo potencial de acarrear un impacto ecológico, así efectos adversos sobre la salud. Sus posibles efectos son de reciente estudio, desde aproximadamente una década atrás cuando en ríos de Alemania se encontraron varios fármacos además de otras sustancias no consideradas como contaminantes, no obstante, pueden ser potencialmente dañinas para el medio ambiente, además de no estar reguladas, por lo que es necesario continuar con las investigaciones que permitan conocer el impacto que provocan tanto al medio ambiente, como al organismo humano. (Reinoso, Serrano, & Orellana, 2017)

Se ha determinado que estos compuestos entran al ambiente a través de diversas fuentes o vías, tales como aguas residuales ya sea de tipo doméstico o industrial, de los residuos de las plantas de tratamiento, de efluentes hospitalarios, actividades agrícolas y ganaderas y de tanques sépticos, los cuales contienen un gran número de componentes orgánicos específicos. (Gil, Soto, Usma, & Gutiérrez, 2012)

El consumo de fármacos en muchos países se cifra en toneladas por año, y muchos de los más usados, entre ellos los antibióticos, se emplean en cantidades similares a las de los pesticidas. Los fármacos detectados en el medio ambiente acuático ya sea



directamente o metabolitos, incluyen analgésicos/antiinflamatorios, antibióticos, antiepilépticos β -bloqueantes, reguladores de lípidos, medios de contraste en rayos X, anticonceptivos orales, esteroides y otros, como broncodilatadores, tranquilizantes, etc. (Tejada & Quiñonez, 2014)

1.2 Contaminante Emergente

Son contaminantes previamente desconocidos o no reconocidos como tales, cuya presencia en el medio ambiente no es necesariamente nueva, pero si la preocupación por las posibles consecuencias de la misma. (Martínez, 2006)

Existen varios contaminantes emergentes presentes en el agua tales como fármacos, compuestos perfluorados, hormonas, drogas de abuso y productos de cuidado e higiene personal. (Gil, Soto, Usma, & Gutiérrez, 2012)

1.3 Tipos de contaminantes emergentes en el agua

1.3.1 Pesticidas

Un pesticida es cualquier tipo de sustancia elaborada para controlar, matar, o repeler una plaga. Tal plaga puede ser cualquier organismo vivo que provoque daño o pérdidas económicas o que transmita o produzca alguna enfermedad. Las plagas pueden ser animales, plantas no deseadas o microorganismos que causan enfermedades a las plantas. (California Department of Pesticide Regulation, 2006)

En un estudio realizado por el Reino Unido, se reportaron concentraciones de metabolitos de plaguicidas medidos en las aguas subterráneas. Estos metabolitos se originaron a partir de compuestos no autorizados en el Reino Unido como DDT (Dicloro Difenil Tricloroetano), heptacloro y atrazina. (Gil, Soto, Usma, & Gutiérrez, 2012)

1.3.2 Productos farmacéuticos

Los productos farmacéuticos en el agua fueron reconocidos como un problema en el medioambiente. Los medios de contaminación principal de estos productos son través de la excreción humana, la eliminación de los productos no utilizados y por el uso agrícola. Una gran variedad de productos farmacéuticos han sido detectados en aguas de la superficie y subterráneas las cuales están asociadas con aguas residuales. De acuerdo con lo antes dicho se ha generado una preocupación a la contaminación de aguas con fármacos. (Gil, Soto, Usma, & Gutiérrez, 2012)



En la actualidad los grupos de fármacos con más relevancia en la contaminación medioambiental son:

- Antibióticos, tienen la posibilidad de que desarrollen cepas bacterianas las cuales serán resistentes al fármaco lo cual lo hace ineficaz para el fin diseñado.
- Medios de contraste en rayos X, este grupo es muy persistente al tratar de eliminarse en una planta de tratamiento, lo cual avanza a contaminar aguas subterráneas fácilmente por medio de la percolación.
- Los citostáticos, tienen una gran potencia farmacológica, tienen propiedades carcinogénicas, mutagénicas o embriogénicas, donde los procesos de eliminación son muy negligentes. Son utilizados como anticonceptivos y tratamientos hormonales como la menopausia y son responsables de muchos fenómenos de infertilidad (Tejada & Quiñonez, 2014)

El crecimiento de la resistencia antimicrobiana a diversos fármacos en los últimos años encamina a la utilización de fluroquinolonas como una opción emergente para tratar empíricamente algunas enfermedades. Las fluroquinolonas pertenecientes a la clase antibiótica donde se engloba la Ciprofloxacina, son antibióticos sintéticos, este fármaco actúa en enzimas específicas las cuales son esenciales cuando se da una viabilidad bacteriana. (Costa, Silva, & Campos, 2016)

Ciprofloxacina

La Ciprofloxacina, denominado como un potente antibiótico perteneciente a la clase de fluroquinolonas que tiene un espectro amplio de actividad que es utilizada como un fármaco contra varios microorganismos patógenos que tienen la posibilidad de llevar a la muerte o incapacitar a seres humanos como animales.

La Ciprofloxacina es utilizada como un medicamento de primera elección para combatir enfermedades de tipo transmisión sexual como la osteomielitis y en varios casos de heridas, el clorhidrato de Ciprofloxacina es un fármaco de importancia utilizado contra el bioterrorismo en el tratamiento del trato respiratorio, denominada como una droga única aprobada por el FDA para que sea suministrada después de que se haya inhalado el Ántrax. (De Souza, De Almeida, Da Silva, & Couri, 2004)

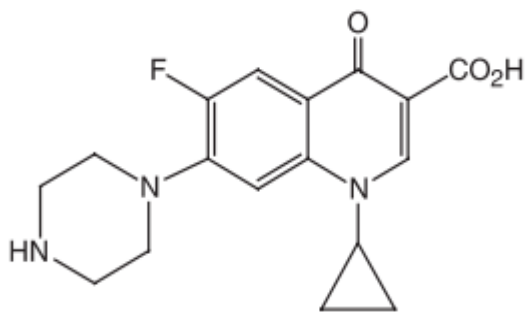


Figura 1: Estructura de la Ciprofloxacina
Fuente: (De Souza, De Almeida, Da Silva, & Couri, 2004)

Sulfametoxazol

El Sulfametoxazol, es un fármaco antimicrobiano el cual pertenece al grupo de las diaminopirimidas y actúa inhibiendo la síntesis de tetrahidrofolato, no permite el crecimiento microbiano al generar una interferencia durante la síntesis de ácidos nucleóticos. Su espectro antibacteriano es moderadamente amplio, su acción está dirigida al combate contra Cocos Grampositivos y Cocos y Bacilos Gramnegativos, especialmente en enterobacterias. El Sulfametoxazol presenta una inactividad contra Neisseria, Mycobacterium, Nocardia, Pneumocytis, Chlamydia y en bacterias las cuales son anaerobias estrictas. (PEDIAMECUM, 2015)

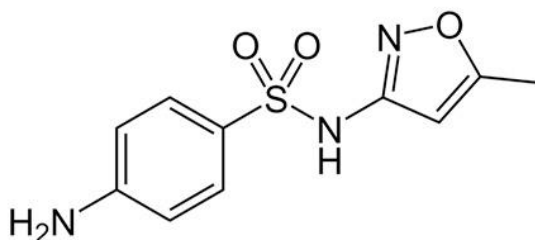


Figura 2: Estructura del Sulfametoxazol
Fuente: (Química Alkano, 2016)

1.4 Técnicas de remoción de fármacos

Tratándose de técnicas de remoción de fármacos, las aguas residuales llegan a las plantas de tratamiento las cuales son tratadas mediante métodos convencionales, donde el fármaco



no se elimina completamente o la remoción no es realizada satisfactoriamente para ciertos productos farmacéuticos, de acuerdo a esto se genera la necesidad de utilizar tratamientos terciarios los cuales están enfocados principalmente en contaminantes emergentes. (Maldonado, 2016)

- **Tratamientos Fisicoquímicos:** En estos tratamientos se encuentran la coagulación y floculación donde no son capaces de eliminar compuestos de tipo endocrinos y productos de clase farmacéutica. En algunos de estos procesos se presentan el de oxidación en donde se forman iones hidroxilo en una cantidad donde pueden interactuar con compuestos orgánicos. Como otro proceso de eliminación tenemos la ultrafiltración el cual utiliza membranas, el uso de este proceso es limitado para algunos compuestos emergentes y surge la necesidad de combinar con procesos como coagulación y adsorción. (Maldonado, 2016)

La adsorción es una técnica importante para la remoción de fármacos ya que el uso de esta técnica no requiere condiciones especiales para la correcta eliminación como condiciones extremas de presión y temperatura, y a su vez no genera subproductos indeseables. Los adsorbentes son de fácil adquisición y la regeneración de los mismos es de un bajo costo y tienen una alta capacidad de adsorción. (Maldonado, 2016)

- **Tratamientos Biológicos:** En estos tratamientos se usan lodos activos o filtros biológicos, que son los encargados de convertir compuestos orgánicos en biomasas que después son separadas de la fase acuosa haciendo uso de sedimentación, otra eliminación se da por humedales donde se eliminan fármacos por mecanismos como fotolisis, adsorción de plantas, acción microbiana y eliminación por adsorción del suelo, la desventaja de los tratamientos biológicos es que no existen muchos estudios. (Maldonado, 2016)
- **Tratamientos avanzados:** Últimamente se han estudiado tecnologías como la nano filtración, osmosis inversa y las denominadas oxidaciones avanzadas donde no es una opción a utilizar si se trata de trabajar con bajos costos de operación debido a su elevado consumo energético. (Maldonado, 2016)



1.5 Adsorción

De manera general la adsorción se define como un fenómeno superficial en donde implica el uso de un adsorbato y un adsorbente donde actúan fuerzas de interacción entre ambos elementos. (Sotelo, Ovejero, Delgado, & Martínez, n.d.)

La operación de adsorción aprovecha las características especiales de ciertos sólidos para que elementos específicos de una solución se concentren sobre la superficie del sólido. (Treybal, 2013)

En el diseño de sistemas de eliminación de contaminantes utilizando la adsorción existe un parámetro especial que depende de diversos factores como la capacidad de adsorción del adsorbente, que a su vez de la misma manera depende de otros factores. Estos son las propiedades del adsorbato como su geometría, tamaño molecular grupos funcionales, hidrofobicidad, polaridad y la solubilidad en agua. Otro factor son las condiciones de la disolución donde engloba a la temperatura, pH, concentración del contaminante, solutos competitivos y fuerza iónica. (Sotelo, Ovejero, Delgado, & Martínez, n.d.)

Un aspecto de gran importancia en la adsorción es el modelo que explique el comportamiento de las fases que están involucradas en el equilibrio que a su vez tienen relación con la capacidad de adsorción. (Sotelo, Ovejero, Delgado, & Martínez, n.d.)

1.5.1 Naturaleza de los adsorbentes

En la adsorción el adsorbente que comúnmente se utiliza de forma granular y los tamaños varían desde aproximadamente 12 mm respecto al diámetro hasta diámetros que poseen 50 μm , incluyendo que los sólidos deben tener ciertas propiedades relativas dependiendo el uso que se le vaya a dar como en el lecho fijo influye si el soluto se encuentra en un medio líquido o gaseoso no deben poseer una caída de presión del flujo demasiado elevada ni tampoco que se arrastre con facilidad por la corriente, también deben poseer una adecuada consistencia para que así al ser manipulados no se reduzca su tamaño inadecuado. (Treybal, 2013)

1.6 Biosorción

Cuando los compuestos químicos que son solubles están presentes en el ambiente de carácter acuoso interacción con los elementos biológicos de dos formas, la primera es que se unen a la pared celular el cual es un proceso que toma como nombre Biosorción o de lo



contrario se acumula dentro de la célula proceso el cual se denomina bioacumulación. (Plaza, 2012)

Según (Plaza, 2012) la biosorción es definida “como un proceso de concentración de sorbato y el prefijo bio hace referencia a que el sorbente es de origen biológico, por lo tanto, la superficie de adsorción tiene una composición química-biológica determinada que dependerá del material biológico empleado”. (Plaza, 2012)

El proceso de biosorción es de simple operación y tiene una semejanza a la adsorción convencional como también a las columnas de Intercambio Iónico. La diferencia entre estas adsorciones radica en el material empleado para el adsorbente donde en la biosorción el material es de origen biológico y cual es metabólicamente inactivo, regenerable y selectivo. (Plaza, 2012)

La biosorción nace como una alternativa más eficiente y de un bajo costo, de la misma manera el proceso biosorción depende de las mismas variables que para la adsorción como el pH, la concentración del biosorbente, tamaño de partícula, etc., por lo cual la optimización del proceso resulta de una gran importancia. En los últimos años se han realizado diversas investigaciones de varios biosorbentes de bajo costo incluyendo varios residuos de origen agrícola como también forestales. (Vera, Uguña, Vázquez, García, & Flores, 2016)

1.6.1 Mecanismos de biosorción

En la Biosorción existen diversos mecanismos para la retención de los iones y estos mecanismos son: Complejación, adsorción física e Intercambio Iónico.

- **Complejación o Quelación**
Mecanismo donde los sitios activos pertenecientes al biosorbente genera un enlazamiento con el adsorbato, mediante enlaces químicos covalentes que a su vez forma determinados complejos. (Sánchez, 2018)
- **Adsorción Física**
Mecanismo de adsorción física rápida y reversible, pero con fuerzas de atracción débiles entre el biosorbente y el soluto. (Sánchez, 2018)
- **Intercambio Iónico**



Proceso en el cual se da un intercambio de iones de un sólido y líquido. Para que el proceso se dé de una manera eficiente se debe tomar en cuenta el equilibrio sólido-sólido líquido y la velocidad de transferencia de materia. (Sánchez, 2018)

1.6.2 Biosorbentes

Biosorbente se denomina aquí adsorbente de origen biológico utilizado para la remoción de contaminantes del medioambiente, estos pueden ser masas vivas como bacterias y hongos o materia sin vida como residuos agrícolas. (Pintado, 2018)

Mazorca: De forma alargada, cuyo tamaño es variado dependiendo de las diferentes especies. Presenta las siguientes partes (Pintado, 2018):

Forma alargada, donde el tamaño es variado dependiendo a la especie a

- **Los pelos de la mazorca:** Parte superior de la mazorca los cuales son encargados de recibir el polen. (Pintado, 2018)
- **Grano:** Compuesto por proteínas, aceites minerales, fibra cruda, lignina entre otros. Se presenta con un color que puede variar entre blanco, amarillo, violáceo lo cual dependerá de la fecundación del polen. (Pintado, 2018)
- **Marlo:** El marlo es el residuo que se genera después del desgrane de la mazorca y este representa del 15% al 30% de la masa total de la mazorca. (Pintado, 2018)

Bagazo de caña: El Bagazo de caña de azúcar es un tipo de material lignocelulósico que se encuentra formado por hemicelulosa, celulosa y lignina. Este es un residuo que se obtiene después de la extracción del jugo de caña de azúcar y este (Pernalet, Piña, Suárez, Ferrer, & Aiello, 2008)

1.6.3 Características del biosorbente

Tipo de material biosorbente

En este punto se toma en cuenta las paredes celulares de los materiales del material biosorbente compuestas por proteínas, polisacáridos y lípidos por ende contienen una variedad de grupos funcionales los cuales tienen la capacidad de enlazar varios compuestos a la superficie del biosorbente. Los grupos funcionales que pueden poseer pueden ser del grupo carboxílico, amino, hidroxílico, fosfato y tiol, donde la diferencia entre



estos tomando como referencia la adsorción es su afinidad y especificidad respecto a la tendencia a enlazarse. (Pinzón & Cardona, 2008)

Densidad real

Según él (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, 2008) “La densidad real es una propiedad física que está definida por la relación entre el peso y el volumen de una masa determinada, lo que significa que depende directamente de las características del material”.

Densidad aparente

La densidad aparente se define como la relación entre la masa del elemento y el volumen ocupado por dicho elemento en el espacio. (Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, 2008)

Tamaño de partícula

Según (Boada, 2015) “La capacidad de biosorción y la velocidad de reacción están fuertemente ligados con el tamaño de partícula, en forma general se considera que mientras menor sea el tamaño del biosorbente mayor será la concentración del adsorbato captado, pero en columnas de lecho fijo habrá más pérdidas de presión convirtiéndose en una operación inviable”.

Porosidad

La porosidad según (Rodriguez, 2010) se define como “El volumen que ocupan los espacios vacíos o volumen poroso por unidad de volumen total de la biomasa”

Superficie específica

Dicha propiedad esta aplicada a los materiales granulares o particulados y se la obtiene mediante la relación entre el área superficial total y la masa del solido o su volumen, para un biosorbente la característica mencionada es de suma importancia debido a que mientras mayor sea la superficie específica mayor probabilidad tiene de que el sorbato tenga contacto con una mayor cantidad de centros activos disponibles y por ende se logra una mayor adsorción. (Boada, 2015)



1.6.4 Propiedades de la disolución

pH

El pH en una fase acuosa es uno de los factores más importantes si se trata de Biosorción de cationes como aniones, teniendo un efecto distinto para ambos casos, en la Biosorción de cationes se da mejor adsorción en pH superiores a 4,5 y de lo contrario en aniones es mejor en un valor bajo entre 1,5 y 4,0. (Izquierdo, 2010)

Presencia de otros solutos

La presencia de otros solutos que no sean el que se quiere remover y que tenga afinidad con el biosorbente afecta a la adsorción por la razón que existe una competencia por los sitios activos por lo cual se disminuye el grado de adsorción. (Silva, 2016)

Concentración de adsorbato

Cuanto mayor sea la concentración inicial, mayor será la cantidad de moléculas compitiendo para ser adsorbidas en la superficie del adsorbente debido al gradiente de concentración (Silva, 2016). La cantidad de adsorbente también influye en la eficiencia de la adsorción, en donde se tiene que si la concentración

1.6.5 Operación

En los procesos de sorción es necesario examinar el tiempo de contacto de la solución con el biosorbente, la concentración inicial del fármaco, la naturaleza del biosorbente, el pH, la temperatura y el tamaño de partícula por eso es de suma importancia analizar los factores para el proceso lo cual nos lleva a obtener mejores resultados en la eliminación del fármaco. (Sánchez, 2018)

a) Método de contacto.

El método de contacto puede ser continuo o también discontinuo, según (Boada, 2015) “En varios estudios se comprobó que hay mayor eliminación de sorbatos en modo continuo respecto del método discontinuo, en lechos fijos hay mayor interacción del sólido y del líquido, mayor concentración del biosorbente y el bombeo de la solución promueve la renovación continuo del soluto existiendo mayor gradiente de concentración”.



b) Tiempo de equilibrio

Es el factor que por el cual se satura el biosorbente y no incrementa la eliminación del fármaco. (Sánchez, 2018)

El tiempo por el cual el biosorbente debe estar en contacto con el sorbato va a depender del equilibrio del sistema. (Boada, 2015)

c) Temperatura

La temperatura se vincula con el tipo de adsorción que presenta el fármaco con la biomasa, cuando dicho proceso de la adsorción es de un carácter físico se efectuará mejor a temperaturas bajas y cuando sea químico mejor será a temperaturas altas. (Boada, 2015)

d) Caudal de alimentación en columnas de lecho fijo

El caudal es uno de los factores más importantes en el proceso de biosorción en columnas de lecho fijo a un nivel macroscópico, cuando se aumenta el caudal genera una disminución del tiempo de contacto, ruptura y un aumento de la pendiente de la curva de ruptura, debido al aumento de la velocidad del fluido dentro de la columna. (Izquierdo, 2010)

1.7 Adsorción en columnas de lecho fijo

Es la opción preferida para el tratamiento de aguas residuales industriales, lo cual se utiliza en modo continuo a gran escala. En dichos sistemas la concentración tanto en la fase sólida como en la líquida varía en el tiempo, porque lleva a una dificultad en el diseño y optimización de columnas de lecho fijo si no se cuenta un modelo de aproximación cuantitativo. Tomando en cuenta desde este sentido el comportamiento dinámico de la columna se describe en términos de perfil de concentración efluente- tiempo, donde lo que se conoce como una curva de ruptura. (Kumar, 2013)

Un sistema de lecho fijo consta de una columna que posee un biosorbente en su interior como un lecho que no se mueve donde se mueve un fluido en sentido ascendente o descendente. El biosorbente deberá tener un tamaño adecuado para evitar una presión excesiva a lo largo de la columna, si existe un tamaño de partícula muy grande provoca un descenso de la superficie específica provocando que la difusión intraparticular sea limitada, si la columna está en serie se puede llevar un mejor control sobre el rendimiento del biosorbente o en paralelo para lograr incrementar la capacidad de nuestro sistema. A escala industrial los procesos comúnmente se llevan de forma continua. (Kumar, 2013)

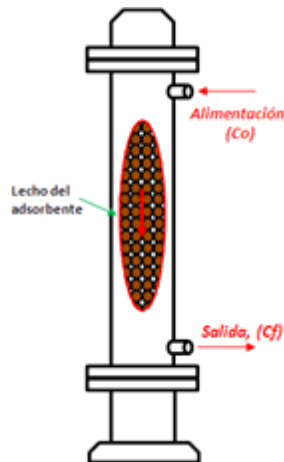


Figura 3: Columna de adsorción.

Fuente: (Gregori, 2014)

En la figura 3. Una solución ingresa de concentración inicial (C_o) ingresa por la parte superior de la misma y atraviesa un lecho de biosorbente donde la superficie específica de dicho lecho al inicio del proceso se encuentra libre de soluto. (Gregori, 2014)

En la salida de la columna al inicio del proceso la concentración del efluente con concentración (C_f) será nula en un breve periodo de tiempo, cuando la solución siga ingresando a la columna las capas siguientes se irán saturando con el soluto, en consecuencia la zona de adsorción se ira desplazando a lo largo de la columna de lecho fijo a una velocidad superior con la que el fluido atraviesa, en un tiempo en el cual la zona de adsorción alcanza el fondo de la columna, provocara un repentino aumento de la concentración del soluto en la solución, instante denominado punto de ruptura. (Gregori, 2014)

Cuando el fluido inicia a atravesar la columna de lecho fijo, empieza a definirse una zona de transferencia de masa la cual varía desde un 0% hasta 100% de concentración inicial de soluto. (Kumar, 2013)

En el instante donde la concentración del soluto en el efluente toma un valor determinado, generalmente se encuentra relacionado con un límite adicionado permitido para el adsórbalo, este límite se denomina como punto de ruptura, esto permitirá calcular un volumen de solución tratada. Después de este punto en la curva se genera un cambio de concentración atreves del tiempo lo que se denomina curva de ruptura. (Kumar, 2013)



Cuando, en la zona de transferencia, el sorbente de la columna queda totalmente saturado, las concentraciones de entrada y salida del efluente de la columna son iguales. (Kumar, 2013)

En el momento que la zona de transferencia del proceso, queda saturada, las concentraciones tanto iniciales como finales de la columna son iguales. (Kumar, 2013)

Cuando se quiere describir una curva de ruptura se tienen varios modelos que van desde modelos simples semiempíricos que poseen pocos parámetros y fáciles de resolver matemáticamente, hasta modelos complicados los cuales consideran una dispersión axial en la dirección del flujo, resistencia a la difusión, difusión intraparticular etc. Que lleva a soluciones matemáticas sumamente complicadas. (Kumar, 2013)

1.8 Espectroscopia visible UV

La espectroscopia UV (Ultravioleta) es utilizada para determinar cuantitativamente componentes de una solución y actualmente es la técnica instrumental analítica más utilizada. Para poder utilizar la espectroscopia UV la sustancia debe tener un color el cual debe ser visible, debido a que adsorbe frecuencias específicas de ondas del espectro visible y transmite otras frecuencias. El rango donde es considerado el visible varía desde los 380 nm a los 750 nm, el rango del cuarzo es de 190 nm a 380 nm. Por esta razón se debe tomar en cuenta ciertos factores que ayudan a inhibir o formar estos patrones coloridos como: (Universidad autonoma de Chihuahua., 2014)

pH: Este parámetro ayuda a la formación de ciertos compuestos coloridos por lo cual se debe tener un control de este parámetro, común mente se utiliza una solución buffer.

Temperatura: La temperatura es importante y más cuando en la reacción el factor cinético es el pilar del análisis. (Universidad autonoma de Chihuahua, 2014)

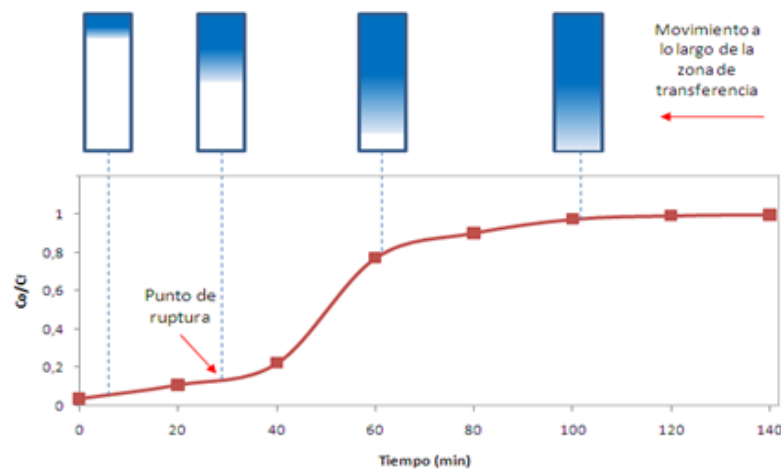
Tiempo: En algunas reacciones es especial tener un cierto lapso de tiempo para que la lectura sea correcta de la solución. (Universidad autonoma de Chihuahua, 2014)

1.9 Curva de ruptura

A partir del punto de ruptura la concentración del soluto no deja de aumentar con el tiempo, hasta igualar el valor que tiene a la entrada del sistema. Si se grafica el perfil de las concentraciones con respecto al tiempo se trazará una curva en forma de S, conocida como

curva de ruptura. Y es la forma experimental de poder observar el comportamiento de los adsorbentes en sistemas continuos, y poder predecir cuando ocurre la saturación. (Gregori, 2014)

Después del punto de ruptura la concentración del soluto va aumentando a medida que pasa el tiempo hasta que sea igual a la concentración inicial. Graficando el perfil de concentraciones vs el tiempo la curva tendrá una forma de S denominada curva de ruptura. En esta curva experimental se puede observar el comportamiento del proceso de adsorción en sistemas que son continuos y se podrá predecir cuándo se dará la saturación. (Gregori, 2014)



*Figura 4: Ejemplo de curva de ruptura
Fuente: (Gregori, 2014)*

1.10 Modelado de columnas de lecho fijo

Cuando se pretende diseñar un sistema de adsorción de lecho fijo con biosorbentes o cualquier otro adsorbente sólido, surge la necesidad de utilizar modelos matemáticos los cuales puedan simular de una manera correcta las curvas de ruptura experimentales.

Dichos modelos tienen que predecir la dinámica del proceso de adsorción, lo cual facilita el desarrollo de aplicaciones innovadoras, como en el tratamiento de aguas residuales. (Olivares, 2013). Para graficar la curva de ruptura en los modelos matemáticos se toman parámetros importantes los cuales son Concentración inicial (C_0), Concentración final (C) y tiempo (t).



1.10.1 Modelo de Thomas

Se considera en el sistema que la dispersión axial del fluido despreciable en el lecho, donde únicamente se controla la adsorción mediante transferencia de masa en la interface. (Lara, Tejada, Villabona, Arrieta, & Conde, 2016)

$$\frac{C}{C_o} = \frac{1}{1 + \exp\left\{\frac{K_{th}}{Q}(q_o m_b - C_o V_{ef})\right\}} \quad (1)$$

En la ecuación (1) K_{th} se denomina como la constante de velocidad de Thomas en ml/min.mg, Q es el caudal en mL/min, V corresponde al volumen del efluente y q_o se denomina como la máxima concentración del soluto en fase sólida en mg/g, C es la concentración final mg/L, y C_o es la concentración inicial en mg/L (Lara, Tejada, Villabona, Arrieta, & Conde, 2016)

La forma lineal del modelo de Thomas se representa en la siguiente ecuación:

$$\ln\left(\frac{C}{C_o} - 1\right) = \frac{K_{th} q_o m_b}{Q} - \frac{K_{th} C_o}{Q} V_{ef} \quad (2)$$

1.10.2 Modelo Yoon-Nelson

El modelo asume que la velocidad con la que disminuye la adsorción para cada molécula de adsorbato es proporcional a la capacidad de adsorción y a la probabilidad de que no se adsorba sobre el adsorbente. Este modelo relaciona el parámetro adimensional C/C_o con el tiempo de operación mediante la constante cinética K_{YN} y el valor τ , que representa el tiempo para retener el 50% del adsorbato inicial. (Lara, Tejada, Villabona, Arrieta, & Conde, 2016)

$$\frac{C}{C_o} = \frac{\exp(k_{YN}t - \tau k_{YN})}{1 + \exp(k_{YN}t - \tau k_{YN})} \quad (3)$$

K_{YN} : Constante de Yoon-Nelson (1/min)

τ : Tiempo medio de ruptura. (min)



t: Tiempo de toma de muestra, (min)

Co: Concentración inicial (mg/L)

C: Concentración final (mg/L)

La forma lineal del modelo de Yoon y Nelson se representa por la siguiente ecuación:

La forma lineal de la ecuación del modelo de Yoon-Nelson está representada por la siguiente ecuación:

$$\ln\left(\frac{C_o}{C} - 1\right) = \tau k_{YN} - k_{YN}t \quad (4)$$

1.11 Criterios de escalado

La metodología que se sigue está basada en la mencionada por (Kumar, 2013) “La cual se basa en tomar en consideración los parámetros de operación del modelo, en función de las mejores condiciones a la cual opera el mismo”

Según la metodología antes dicha se debe cumplir los siguientes principios:

1. Existirá similitud geométrica, basada en una relación altura diámetro entre columnas, expresada en la ecuación 5:

$$\frac{H}{D} = \frac{h}{d} \quad (5)$$

Donde:

- H: Altura de la columna (cm)
- h: Altura de la columna a escala (cm)
- D: Diámetro de la columna (cm)
- d: Diámetro de la columna a escala (cm)

Además, se basa en las áreas transversales correspondientes a cada columna de esta manera el área queda expresada según la ecuación 6:

$$A = \pi * r^2 \quad (6)$$

El volumen se calcula a partir del área y la altura del lecho enunciada en la fórmula (6), despejando el volumen se tiene:

$$36 \quad (7)$$



$$V = A * h$$

La masa de biosorbente es proporcional a la altura del lecho, lo cual direcciona a la fórmula 8.

$$P = \frac{m}{V} \quad (8)$$

$$m = P * V \quad (9)$$

En donde la densidad P será igual en las demás columnas al tratarse del mismo biosorbente.

2. Respecto a las propiedades físicas del fluido deberán mantenerse constantes, por lo que garantiza el régimen de transferencia de masa, existiendo una similitud cinemática.
3. Deberá existir una semejanza dinámica por que el número de Reynolds es constante, manteniendo constante la velocidad lineal de flujo en las dos columnas, conociendo el caudal se puede calcular la velocidad del flujo basándonos en las ecuaciones 10 y 11:

$$Q = A * v \quad (10)$$

$$v = \frac{Q}{A} \quad (11)$$



CAPÍTULO II: METODOLOGÍA

2.1 Biosorbentes

2.1.1 Preparación de los biosorbentes

2.1.1.1 *Bagazo de caña*

Obtención de los materiales biosorbentes

La materia prima se obtuvo de las molindas ubicadas en la zona de Yunguilla

Lavado

En primer lugar, se procedió con el cortado de la corteza de la caña de azúcar, a continuación, se troceó y se lavó con agua varias veces hasta remover los azúcares, taninos, pigmentos y compuestos solubles adheridos en la superficie.

Secado

El secado se realizó en estufa a 60° C por 8 horas para remover la humedad contenida en el bagazo lavado.

Proceso de molienda y clasificación por tamaños

El proceso fue realizado en dos etapas:

- 1) Molido del bagazo en el cual se redujo el tamaño del bagazo al realizar la molienda empleando un molino manual.
- 2) El tamizado del bagazo se realizó en un tamiz No. 020 y 028 para obtener tres diámetros de partícula, una fracción fina con diámetro de partícula menor a 0,594 mm, una fracción media con un diámetro de partícula mayor a 0,594 mm y menor a 0,850 mm, y una fracción gruesa con un diámetro de partícula mayor a 0,850 mm.

2.1.1.2 *Mazorca de maíz*

Selección

Los residuos maíz fueron obtenidos en las zonas rurales de cantón Cuenca, en donde es llamada "tusa de maíz" o "marlo de maíz", al ser un material de desecho es de fácil acceso y obtención, seleccionando así los que se encuentren en condiciones óptimas para su procesamiento y posterior utilización como biosorbente.



Lavado inicial

El residuo de maíz fue lavado varias veces con agua potable, con el fin de eliminar residuos e impurezas contenidas en el mismo.

Secado

Los residuos obtenidos fueron secados al sol, para posteriormente secarlos en la estufa por 8 horas a 60 °C.

Reducción del tamaño

El proceso de molido se realizó en dos etapas:

- 1) Troceado o cortado: En esta fase se redujo el tamaño de los marlos al cortarlos en cuatro partes.
- 2) Molido: En esta etapa se procedió con el molido de los marlos cortados en un molino manual.

Tamizado

Al igual que el bagazo la mazorca del maíz molida se tamizó en un tamiz No. 20 y 40 para obtener tres diámetros de partícula, una fracción fina con diámetro de partícula menor a 0,594 mm, una fracción media con un diámetro de partícula mayor a 0,594 mm y menor a 0,850 mm, y una fracción gruesa con un diámetro de partícula mayor a 0,850 mm

Lavado final

Luego del proceso de tamizado se realizó tres lavados consecutivos del marlo molido en un vaso de precipitación de 1 litro de capacidad mediante un agitador magnético, por un tiempo total de una hora y media con el fin de eliminar la fuerte coloración que aun presentaba el marlo molido.

Secado final

Finalmente se secó en una estufa a 60 °C por 8 horas para su posterior utilización.

2.2 Preparación de las soluciones acuosas

En este trabajo se prepararon soluciones de Ciprofloxacina y Sulfametoxazol a concentraciones de 10 mg/l y variaciones de 5 mg/l.



2.2.1. Preparación de las soluciones de fármacos

Los fármacos son de grado analítico (ALDRICH SIGMA) y el metanol (MERK). Las soluciones de los dos fármacos se prepararon en agua destilada con metanol al 1% v/v. Se preparó soluciones de Ciprofloxacina y Sulfametoxazol de concentración de 5, 9,10 y 11 ppm, el pH de 6 se reguló adicionando NaOH 2,5 N o adicionando ácido clorhídrico 0,1 N.

2.2.2. Preparación del blanco

Para la preparación del blanco se colocó 10 ml de metanol y se aforó a 1000 ml en un balón de aforo.

2.3 Estudio del proceso de biosorción en columnas de lecho fijo.

En el estudio del proceso de biosorción, se debe tener en cuenta que las columnas preparadas deben trabajar en condiciones parecidas a lo que se debe tener a nivel industrial, buscando de esta manera las condiciones óptimas para trabajar con bagazo y mazorca de maíz.

2.3.1 Montaje experimental.

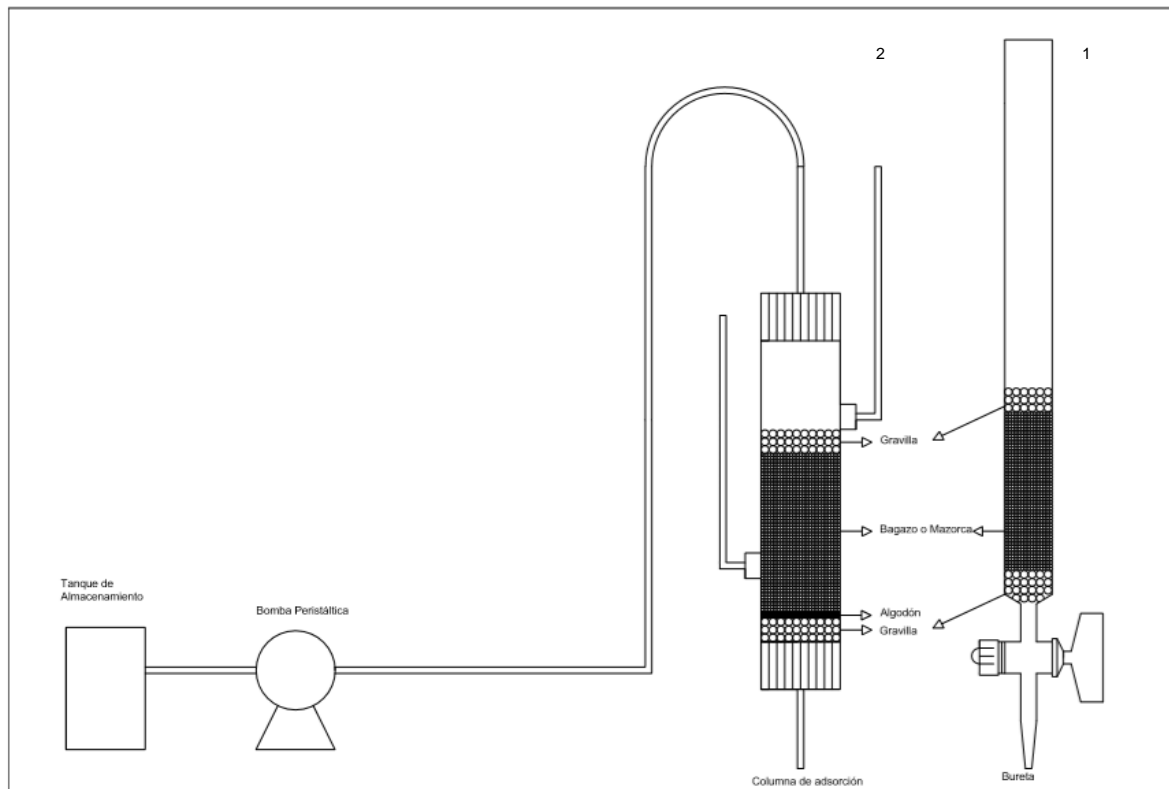


Figura 5: Montaje experimental, Columna 2 (Izquierda) y Columna 1 (Derecha)
Fuente: (Autores)

Como podemos observar en la figura 5, se realiza el montaje de dos columnas 2, (a y b) y dos columnas 1 (a y b) seguido a esto cada columna se llena con la dosis de biosorbente, se hace la humectación de cada columna con agua destilada, luego se pasa a través de la columna 1a el blanco, y en la 1b el respectivo fármaco, el mismo proceso se repite para la columna 2.

2.3.1.1. Columnas 1

Dos columnas de tamaño de 1,50 cm de diámetro, y una altura de 50,00 cm, dichas columnas se armaron colocando gravilla en la parte inferior, seguida del respectivo biosorbente a emplear, y finalmente una cantidad de gravilla en la parte superior para evitar la flotación del lecho.

La operación de alimentación de las columnas se realizó en forma descendente mediante la adición de un flujo constante de solución manteniendo una altura constante, regulando el caudal mediante las llaves de la bureta.



Figura 6: Buretas con bagazo de caña
Fuente: (Autores)

2.3.1.2. Columnas 2

Dos columnas de vidrio de 2,20 cm de diámetro y una altura de 35,00 cm, dichas columnas se armaron con su respectiva tapa de la parte inferior la cual proporcionara el goteo para la recolección de muestras. A continuación, se colocó una cantidad suficiente de gravilla de 3,00 cm de diámetro para que cubra la base de la columna, luego se puso un pedazo de algodón de manera que evite el paso de partículas de bagazo o de mazorca, dependiendo el caso y posteriormente el biosorbente, compactando el lecho de manera que se alcance la altura y la densidad del lecho deseada, finalmente se vuelve a poner una cantidad de gravilla de 1 cm de diámetro en la parte superior de la columna con el fin de evitar que las partículas de biosorbente floten al momento de suministrar el caudal de alimentación.

La operación de alimentación de las columnas se realizó en forma descendente, mediante una bomba peristáltica con el fin de encontrar el caudal de alimentación óptimo para el modelado y escalado en las columnas.



*Figura 7: Columnas de lecho fijo con bagazo de caña
Fuente: (Autores)*

- Previo al paso de la solución del fármaco y del blanco por las distintas columnas se realizó con el humedecido o lavado de las mismas con 100 ml de agua destilada, verificando el porcentaje de agua destilada retenido por el biosorbente.
- Se tomaron muestras cada cinco minutos a la salida de la columna, el tiempo de toma de muestra dependerá del caudal de alimentación y altura del lecho.
- Las muestras se analizaron mediante un análisis ultravioleta a fin de conocer la variación de la concentración de salida respecto al tiempo.

2.3.2 Estudios de escalado

Para los estudios de escalado se tomó en cuenta la relación altura diámetro de las columnas, para en base a dichos criterios obtener una masa equivalente de biosorbente entre las columnas 1 y 2.

Según Kumar (2013) se aplicaron los siguientes principios:

1. Similitud geométrica, basada en una relación altura diámetro entre columnas, expresada en la siguiente formula:

$$\frac{H}{D} = \frac{h}{d}$$

Donde:

H: Altura de la columna (cm)

h: Altura de la columna a escala (cm)



D: Diámetro de la columna (cm)

d: Diámetro de la columna a escala (cm)

El área transversal de la columna fue calculada con la siguiente fórmula:

$$A = \pi * r^2$$

A partir del área y la altura calculadas anteriormente pudimos calcular el volumen

$$V = A * h$$

Al obtener la densidad experimental, y el volumen, se puede calcular la masa del biosorbente a emplear.

$$P = \frac{m}{V}$$

$$m = P * V$$

Donde la densidad P será la misma para las distintas columnas al tener el mismo adsorbente.

2. En todas las pruebas realizadas se trabajó a temperatura ambiente
3. Se trabajó con las mismas soluciones en las distintas columnas
4. El caudal empleado fue equivalente entre la columna 1 y la columna 2 en base a la siguiente fórmula.

$$Q = A * v$$

$$v = \frac{Q}{A}$$

2.3.3 Estudios hidrodinámicos

Según Kumar (2013) es necesario encontrar el caudal o flujo adecuado de solución de manera que permita la adsorción correcta del fármaco para evitar la pronta saturación de la



columna además de la inundación de la misma y también ayuda al escalamiento, correspondiendo cada caudal de la Columna 1 a uno de la Columna 2 en orden. Se trabajó con diversos flujos, los cuales están descritos en la siguiente tabla:

Tabla 1: Estudios hidrodinámicos para las distintas columnas
Fuente: (Autores)

	Diámetro (cm)	Caudal (ml/min)
Columna 1	1,5	1,50
		2,50
		3,00
Columna 2	2,2	3,30
		5,50
		6,60

2.3.4 Estudios de concentración

Los estudios de concentración se realizaron con 5,00 mg/L y la otra con 10,00 mg/L de las soluciones de Ciprofloxacina y Sulfametoxazol.

2.3.5 Estudio de remoción

Al determinar las condiciones hidrodinámicas, se continúa con el estudio de remoción de los fármacos Ciprofloxacina y Sulfametoxazol de la siguiente manera:

2.3.5.1 Obtención de las curvas de ruptura

Luego de determinadas las concentraciones de las muestras de Ciprofloxacina y Sulfametoxazol recolectadas, se procedió con las gráficas de las curvas de ruptura, para las distintas variaciones de altura, masa y caudal de alimentación, así como el escalado de las mismas empleando el software EXCEL 2016.

2.3.5.2 Influencia de la altura del lecho y el flujo en el proceso de biosorción

Se emplearon distintas alturas del lecho de biosorbente para el proceso de biosorción y se estudió su influencia en la adsorción de los fármacos Ciprofloxacina y Sulfametoxazol.

Cabe destacar que la altura del lecho viene dada por la masa del biosorbente empleado, en una relación indirecta.



2.3.6 Estudio del comportamiento del proceso de biosorción en columna

Los parámetros de funcionamiento para la columna se obtuvieron mediante las siguientes ecuaciones:

Velocidad de alimentación del soluto (Treybal, 2013)

$$Fa = uo * co$$

Donde:

- Fa = Velocidad de alimentación del soluto (mg/cm²*min)
- uo = Velocidad superficial
- co = Concentración

Capacidad del biosorbente (Treybal, 2013)

$$W sat = \frac{Fa * tsat}{h * P}$$

Donde:

- $W sat$ = Capacidad máxima de la columna (mgsoluto/gbagazo)
- Fa = Velocidad de alimentación del soluto (mg/cm²*min)
- H = *Altura del lecho (cm)*
- $t sat$ = Tiempo de saturación de la columna (min)

$$Wb = \frac{Fa * tb}{h * P}$$

Donde:

- Wb = Capacidad máxima de la columna (mgsoluto/gbagazo)
- Fa = Velocidad de alimentación del soluto (mg/cm²*min)
- H = *Altura del lecho (cm)*
- tb = Tiempo de ruptura de la columna (min)



Longitud de lecho no utilizado (Treybal, 2013)

$$LUB = h * \left(1 - \frac{Wb}{W_{sat}}\right)$$

Donde:

- LUB = Longitud de lecho no utilizado
- h = Longitud de lecho
- Wb = Capacidad del biosorbente en el tiempo de ruptura (mg/g)
- W_{sat} = Capacidad del biosorbente en el tiempo de saturación (mg/g)

2.4 Modelado matemático del proceso de biosorción en columnas de lecho fijo

Para el estudio de biosorción en columnas de lecho fijo en sistemas minicomponentes, se tomaron en cuenta los modelos matemáticos de Yoon Nelson, y Thomas, los cuales pueden describir el comportamiento del sistema biosorbente-fármaco, partiendo del ajuste de los resultados experimentales a los modelos mediante un análisis de regresión lineal.

2.4.1 Modelo de Thomas

La forma lineal del modelo de Thomas se representa por la siguiente ecuación:

$$\ln\left(\frac{C}{C_0} - 1\right) = \frac{Kthqm_B}{Q} - \frac{KthC_0}{Q}V_{ef}$$

De la gráfica de $\ln((C_0/C) - 1)$ vs V_{ef} (Volumen del efluente) se obtiene los valores de los parámetros del modelo.

2.4.2 Modelo Yoon-Nelson

La forma lineal del modelo de Yoon - Nelson se representa por la siguiente ecuación:

$$\ln\left(\frac{C_0}{C} - 1\right) = \tau k_{YN} - k_{YN}t$$

De la gráfica de $\ln((C_0/C) - 1)$ vs el tiempo se puede obtener KYN y τ .

2.5 Análisis estadístico

Las pruebas se realizaron por duplicado, presentando los promedios de los valores obtenidos.



La evaluación del ajuste a los modelos matemáticos se hizo en función del coeficiente de correlación R^2 y la función error.(Gonzales, 2010)

$$Ep = \left| \frac{Vv - Va}{Vv} \right| \times 100$$

Ep: Error Porcentual

Vv: Valor Verdadero

Va: Valor aproximado

2.6 Disposición de los residuos generados

Al concluir los procesos de biosorción en columnas de lecho fijo, los residuos generados fueron colocados en bandejas de aluminio para un posterior secado en la estufa.



CAPÍTULO III: RESULTADOS

La construcción de las curvas de ruptura fue usada para analizar los datos obtenidos en los ensayos de la adsorción de los fármacos sobre los residuos usando las columnas de lecho fijo. Las concentraciones expresadas (C/C_0) del fármaco en la solución se representaron en función del tiempo de operación (min) para obtener las curvas de ruptura en las columnas. Los parámetros utilizados en este estudio se proporcionan en la Tabla 2.

Tabla 2: Simbología de las variables del proceso
Fuente: (Autores)

Descripción	Símbolo
Altura del lecho	h (cm)
Caudal de alimentación	Q (ml/min)
Masa de adsorbente	m (g)
Concentración inicial del fármaco	C_0 (ppm)
Concentración del fármaco en durante el proceso	C (ppm)
Tiempo	t (min)
Longitud de lecho no utilizado	LUB (cm)
Capacidad de sorción del lecho al 10%	W_b (mg/g)
Capacidad de sorción del lecho al 50%	W_{sat} (mg/g)

3.1 Biosorción en columnas

En el estudio de adsorción se trabaja la variación de los parámetros: caudal de alimentación, altura del lecho y concentración del fármaco.

3.1.1 Estudio en columnas de lecho fijo con bagazo de caña como biosorbente

Los estudios fueron realizados, teniendo en cuenta que el punto de ruptura alcance una concentración del 10% de la concentración inicial (C_0).

3.1.2 Estudio de la remoción de Ciprofloxacina

3.1.2.1 Estudio del efecto del caudal

Se varió el caudal manteniendo constantes los demás parámetros de la columna 1, con diámetro de columna 1,50 cm, altura de 8,30 cm, pH de 6,00; concentración de 10,00 ppm, los datos son presentados en la tabla 3.



Tabla 3: Estudio del efecto del caudal en columnas de lecho fijo Q1) Caudal 1 Q2) Caudal 2

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Caudal	Q1	2,50	ml/min
	Q2	3,00	
Masa del adsorbente	m	2,00	g
Altura del lecho	h	8,30	cm
Concentración inicial	Co	10,00	ppm
Tiempo	t	180,00	min

En la ilustración 8, se muestra el comportamiento de la columna descrito en la tabla 3.

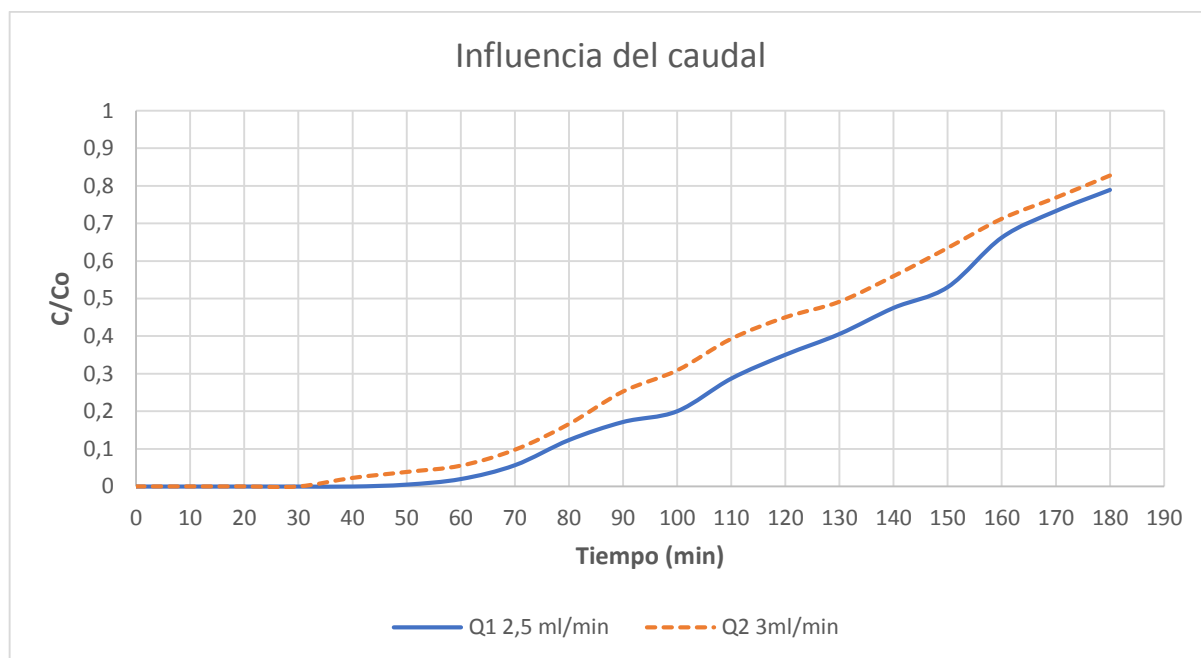


Figura 8: Comparación de caudales de alimentación en un sistema mono-componente para el bagazo de caña
Q1) Caudal 1 Q2) Caudal 2
Fuente: (Autores)

El tiempo de punto de ruptura disminuyó al aumentar el flujo de 2,50 ml/min a 3,00 ml/min como se muestra en la tabla 4. La capacidad de remoción de la columna se redujo de 1,110 mg/g a 0,456 mg/g, lo que indica que la adsorción de la Ciprofloxacina depende del caudal, como se observa en la biosorción de metales (Khitous, Moussous, Selatnia, & Kherat, 2016). Es probable que esta reducción en la capacidad de remoción se deba a la disminución del tiempo de contacto entre la Ciprofloxacina y el adsorbente con velocidades de flujo más altas. El aumento del flujo también aumenta el porcentaje de lecho no utilizado,

lo que contribuye a la disminución de la capacidad de adsorción y la eficiencia de la columna (Tian, Yuan; Gao, Bin; Morales, Verónica; Chen, Hao; Wang, Yu; Li, 2013) & (Sadaf & Bhatti, 2014) (S & C, 2013)

Tabla 4: Parámetros de las curvas de ruptura con variación de caudal para la adsorción de Ciprofloxacina con bagazo de caña como biosorbente

Fuente: (Autores)

Flujo (ml/min)	Tiempo de ruptura (min)	LUB	%LUB	W sat	W b
2,5	76,000	4,025	48,492	2,156	1,110
3,0	70,000	6,298	75,881	1,890	0,456

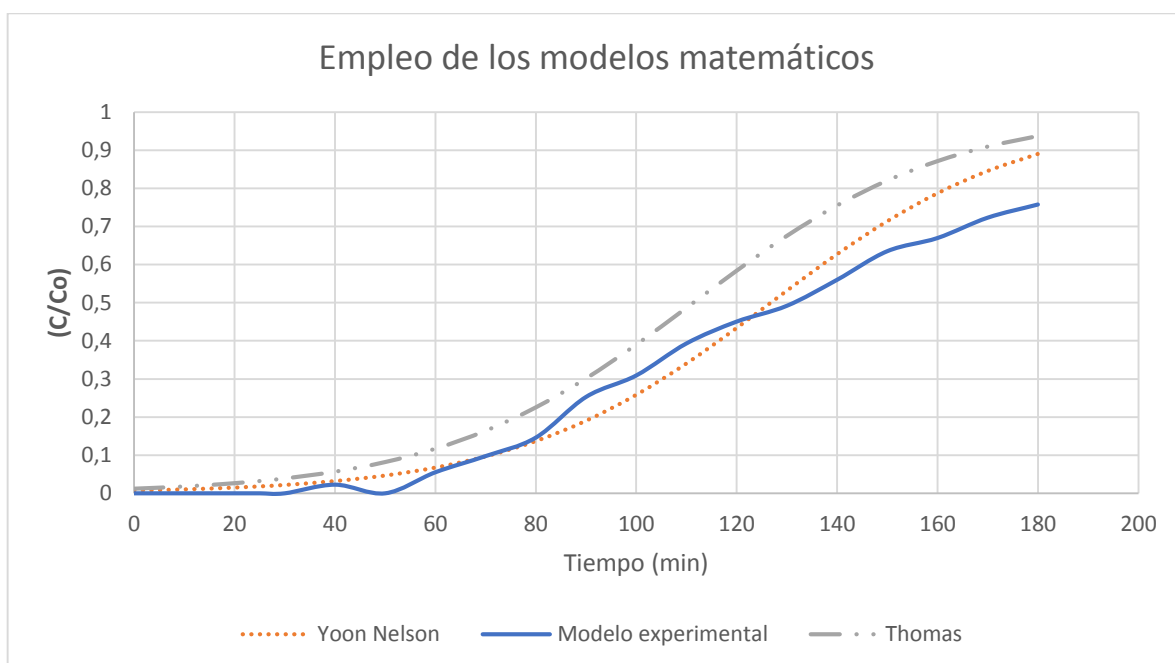


Figura 9: Curva experimental (Q1 2,5 ml/min) vs modelos matemáticos

Fuente: (Autores)

Con los datos las curvas de la figura 9 se obtuvo los valores representados en la tabla 5, en base a dichos resultados se tomó en cuenta que el coeficiente de correlación es muy similar en cuanto los modelos matemáticos empleados, (Calero et al., 2012) sin embargo el porcentaje de error es mucho mayor para el modelo de Thomas, demostrando así que el modelo que mejor se adapta a la curva de ruptura es el modelo de Yoon Nelson, lo que concuerda con (Pachathu, A., Ponnusamy, K., & Srinivasan, 2016) Este modelo considera



que la probabilidad de adsorberse de cada molécula de adsorbato disminuye a una velocidad proporcional a la cantidad de moléculas adsorbidas.

Tabla 5: Constantes de los modelos matemáticos empleados en el estudio del caudal
Fuente: (Autores)

Columna	Modelos	Constantes de los modelos matemáticos			
		KYN	KTH	R2	Error %
1	Yoon Nelson	0,035	-----	0,875	13,250
	Thomas	-----	3,879	0,859	39,580

3.1.2.2 Estudio del efecto de la altura

El aumento de la altura tiene relación directa con el aumento de la masa, es decir a mayor masa mayor altura del lecho.

La remoción de fármacos en una columna de lecho fijo depende, entre otros factores, de la cantidad de adsorbente utilizado, o lo que es lo mismo, la altura del biosorbente con el cual se está trabajando, por ello se analizó el efecto que la cantidad de bagazo de caña tiene en el proceso de adsorción de Ciprofloxacina, para lo cual se experimentó con 2 alturas diferentes de lecho a 4,00 y 6,00 cm.

Se varió la altura y la masa manteniendo constantes los demás parámetros, de la columna 1, con diámetro de columna 1,50 cm, caudal de 3,00 ml/min, pH de 6,00; concentración de 10,00 ppm, los datos son presentados en la tabla 6.

Tabla 6: Estudio del efecto de la altura en columnas de lecho fijo h1) Altura 1 h2) Altura 2
Fuente: (Autores)

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Caudal	Q	3,00	ml/min
Masa del adsorbente	m1	1,00	g
	m2	1,50	
Altura del lecho	h1	4,00	cm
	h2	6,00	
Concentración inicial	Co	10,00	ppm
Tiempo	t	180,00	min

En la figura 10 se muestra el comportamiento de la columna descrito en la tabla 6

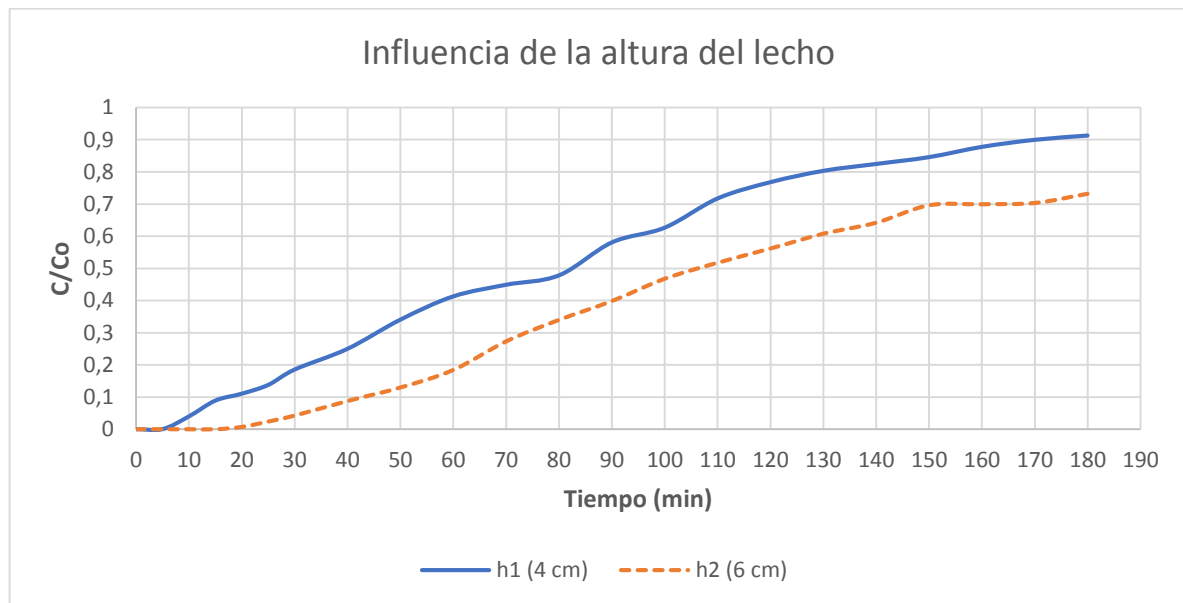


Figura 10: Comparación de las distintas alturas de biosorbente para el bagazo de caña

Fuente: (Autores)

El tiempo de punto de ruptura aumento al aumentar la altura del lecho de 4,00 cm a 6,00 cm como se muestra en la tabla 7. La capacidad de remoción de la columna se aumentó de 0,386 mg/g a 1,285 mg/g al aumentar la altura del lecho, al igual que tiempo de ruptura (Khitous et al., 2016) Es probable que este aumento en la capacidad de sorción se deba al mayor tiempo de contacto entre la Ciprofloxacina y el adsorbente al tener la columna una mayor cantidad de masa que proporciona una mayor cantidad de sitios activos para la adsorción. El aumento de la altura del lecho también influye en el aumento de la longitud de lecho no utilizado, lo que contribuye al aumento de la capacidad de adsorción y la eficiencia de la columna. Una mayor altura del lecho dio como resultado un mayor volumen de solución tratada, sin embargo, no hay una diferencia significativa en las curvas de ruptura.

Tabla 7: Parámetros de las curvas de ruptura con variación de altura para la adsorción de Ciprofloxacina con bagazo de caña como biosorbente

Fuente: (Autores)

Altura del lecho (cm)	Tiempo de ruptura (min)	LUB	%LUB	W sat	W b
4,000	15,000	2,506	62,630	1,531	0,386
6,000	40,000	4,489	74,825	3,441	1,285

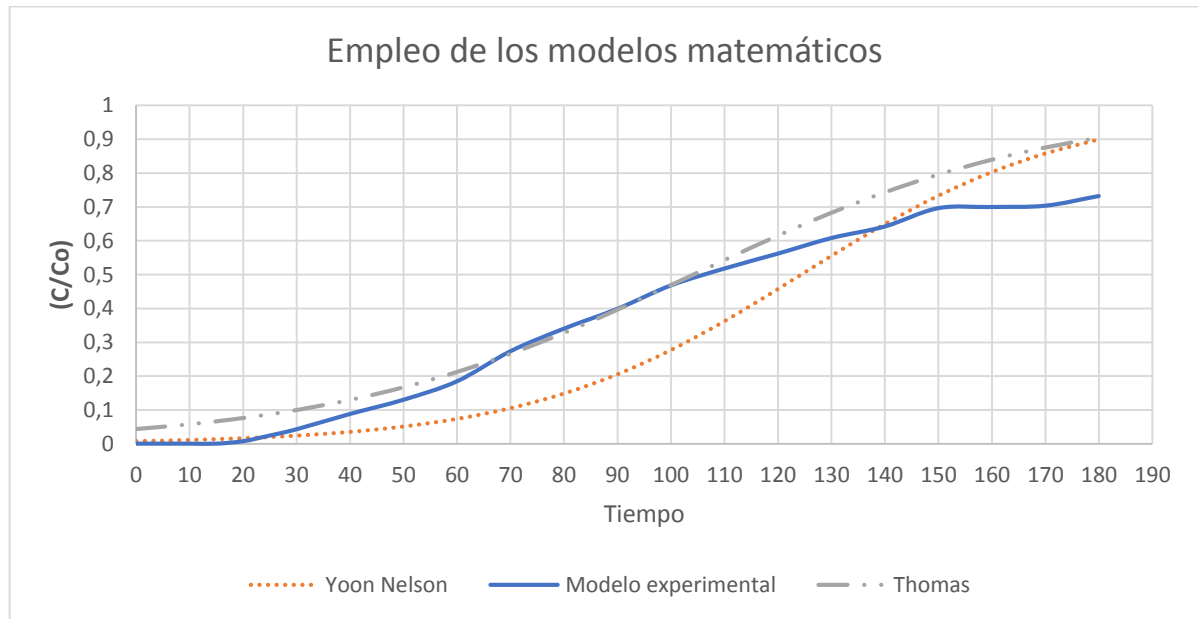


Figura 11: Curva experimental (h2 6cm) vs modelos matemáticos

Fuente: (Autores)

La figura 11 muestra las curvas de ruptura experimentales y de los modelos matemáticos Yoon Nelson y Thomas, los datos obtenidos son representados en la tabla 8, el coeficiente de correlación es muy similar para los dos modelos matemáticos, (Calero et al., 2012) sin embargo el porcentaje de error es mucho mayor para el modelo de Thomas, demostrando así que el modelo que mejor se adapta a la curva de ruptura es el modelo de Yoon Nelson. Lo cual indica que, como el caso anterior, los datos experimentales de la adsorción de la Ciprofloxacina se ajustan al modelo de Yoon Nelson, mostrando que la velocidad de adsorción disminuye cuando los sitios activos se van saturando, lo que concuerda con lo que sucede en el proceso de adsorción del fármaco en bagazo de caña de azúcar en un proceso en batch (Peñafiel, M, E; Vanegas, M, E; Bermejo, D; Matezans, J, M; Ormad, M, 2019)



Tabla 8: Constantes de los modelos matemáticos empleados en el estudio de la altura
Fuente: (Autores)

Columna	Modelos	Constantes de los modelos matemáticos			
		KYN	KTH	R2	Error %
1	Yoon Nelson	0,028	-----	0,715	15,750
	Thomas	-----	2,677	0,700	15,980

3.1.2.3 Estudio del efecto de la concentración

Se varia la concentración de la solución de fármaco manteniendo constantes los demás parámetros, de la columna 1, con diámetro de columna 1,50 cm, caudal de 3,00 ml/min, pH de 6,00; concentración de 10,00 ppm, los datos son presentados en la tabla 9.

Tabla 9: Estudio del efecto de la concentración en columnas de lecho fijo Co1) Concentración inicial 1 Co2) Concentración inicial 2
Fuente: (Autores)

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Caudal	Q	3,00	ml/min
Masa de adsorbente	m	2,00	g
Altura del lecho	h	8,30	cm
Concentración inicial	Co1	9,00	ppm
	Co2	11,00	
Tiempo	t	200,00	min

En la figura 12 se muestra el comportamiento de la columna descrito en la tabla 9.

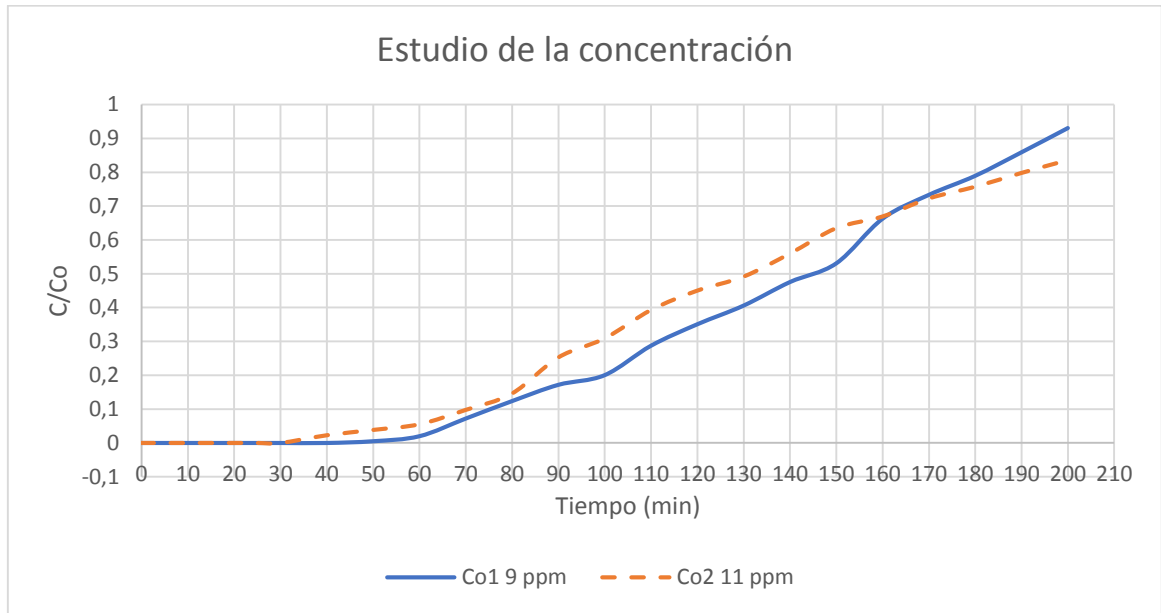


Figura 12: Comparación de las distintas concentraciones en un sistema mono-componente para el bagazo de caña
Fuente: (Autores)

El tiempo de punto de ruptura disminuyó al aumentar la concentración (Khitous et al., 2016) de 9,00 ppm a 11,00 ppm como se muestra en la tabla 10. El aumento de la concentración también aumenta el punto de saturación al 100%. La capacidad de remoción de la columna aumentó ligeramente de 0,733 mg/g a 0,856 mg/g. Es probable que este aumento en la capacidad de sorción se deba a que la concentración mayor de Ciprofloxacin tienda a una saturación más rápida del biosorbente en el punto de ruptura. El aumento de la concentración también disminuyó la longitud de lecho no utilizado, lo que contribuye al aumento de la capacidad de adsorción e influye en la eficiencia de la columna.

Tabla 10: Parámetros de las curvas de ruptura con variación de concentración para la adsorción de Ciprofloxacin con bagazo de caña como biosorbente
Fuente: (Autores)

Concentración inicial (ppm)	Tiempo de ruptura (min)	LUB	%LUB	W sat	W b
9,000	75,000	6,349	76,499	1,929	0,733
11,000	70,000	5,148	62,019	1,939	0,856

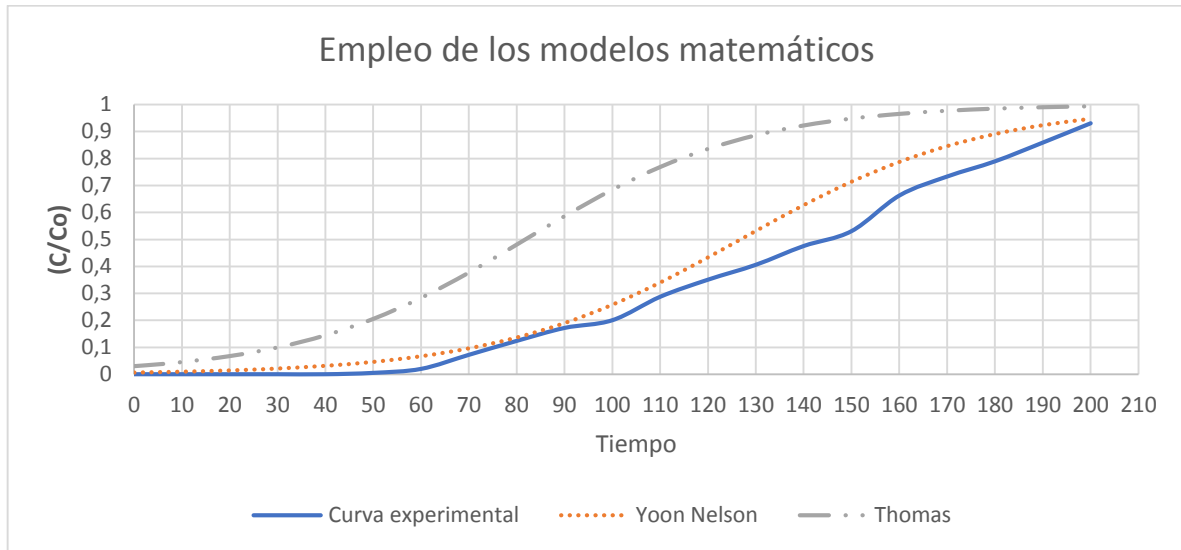


Figura 13: Curva experimental (Co1 9 ppm) vs modelos matemáticos

Según las curvas obtenidas en la figura 13 se obtuvieron los datos representados en la tabla 11, en base a dichos resultados se puede observar que el coeficiente de correlación es muy similar en cuanto los modelos matemáticos empleados, (Calero et al., 2012) sin embargo el porcentaje de error es mucho mayor para el modelo de Thomas, demostrando así que el modelo que mejor se adapta a la curva de ruptura es el modelo de Yoon Nelson

*Tabla 11: Constantes de los modelos matemáticos empleados en el estudio de la concentración
Fuente: (Autores)*

Columna	Modelos	Constantes de los modelos matemáticos			
		KYN	KTH	R2	Error %
1	Yoon Nelson	0,042	-----	0,909	13,950
	Thomas	-----	4,352	0,889	42,630

3.1.3 Estudio de la remoción de Sulfametoxazol

3.1.3.1. Estudio del efecto del caudal

Se variará el caudal manteniendo constantes los demás parámetros, de la columna 1, con diámetro de columna 1,50 cm, altura de 16,00 cm, pH de 6,00; concentración de 5,00 ppm, los datos son presentados en la tabla 12.



Tabla 12: Estudio del efecto del caudal en columnas de lecho fijo Q1) Caudal 1 Q2) Caudal 2
Fuente: (Autores)

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Caudal	Q1	1,50	ml/min
	Q2	2,00	
Masa del adsorbente	m	4,00	g
Altura del lecho	h	16,00	cm
Concentración inicial	Co	5,00	ppm
Tiempo	t	110,00	min

En la figura 14 se muestra el comportamiento de la columna descrito en la tabla 12.

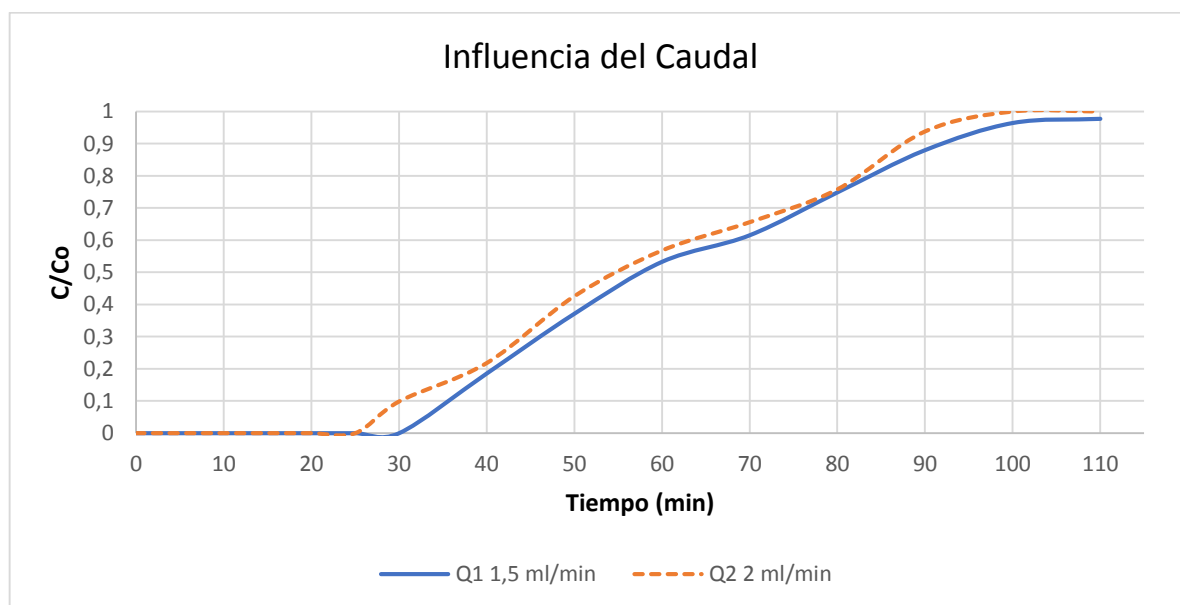


Figura 14: Comparación de caudales de alimentación para el bagazo de caña

Fuente: (Autores)

Al igual que lo sucedido con la adsorción de la Ciprofloxacina, el tiempo de punto de ruptura disminuyó al aumentar el flujo de 1,50 ml/min a 2,00 ml/min como se muestra en la tabla 13, y la capacidad de remoción (W_b) de la columna se redujo de 0,024 mg/g a 0,021 mg/g. El aumento del flujo también aumenta el porcentaje de lecho no utilizado, lo que contribuye a la disminución de la capacidad de adsorción y la eficiencia de la columna (Tian, Yuan; Gao, Bin; Morales, Verónica; Chen, Hao; Wang, Yu; Li, 2013) & (Sadaf & Bhatti, 2014) (S



& C, 2013). La diferencia entre la adsorción del Sulfametoxazol y la Ciprofloxacina sobre bagazo de caña de azúcar está en la forma de curva de ruptura, el Sulfametoxazol produce una curva más elevada, pero la cantidad de fármaco adsorbido es menor que el que se logra con la Ciprofloxacina.

Tabla 13: Parámetros de las curvas de ruptura con variación de caudales para la adsorción de Sulfametoxazol con bagazo de caña como biosorbente:

Fuente: (Autores)

Flujo (ml/min)	Tiempo de ruptura (min)	LUB	%LUB	W sat	W b
1,500	35,000	6,237	38,983	0,045	0,024
2,000	30,000	7,271	45,445	0,035	0,021

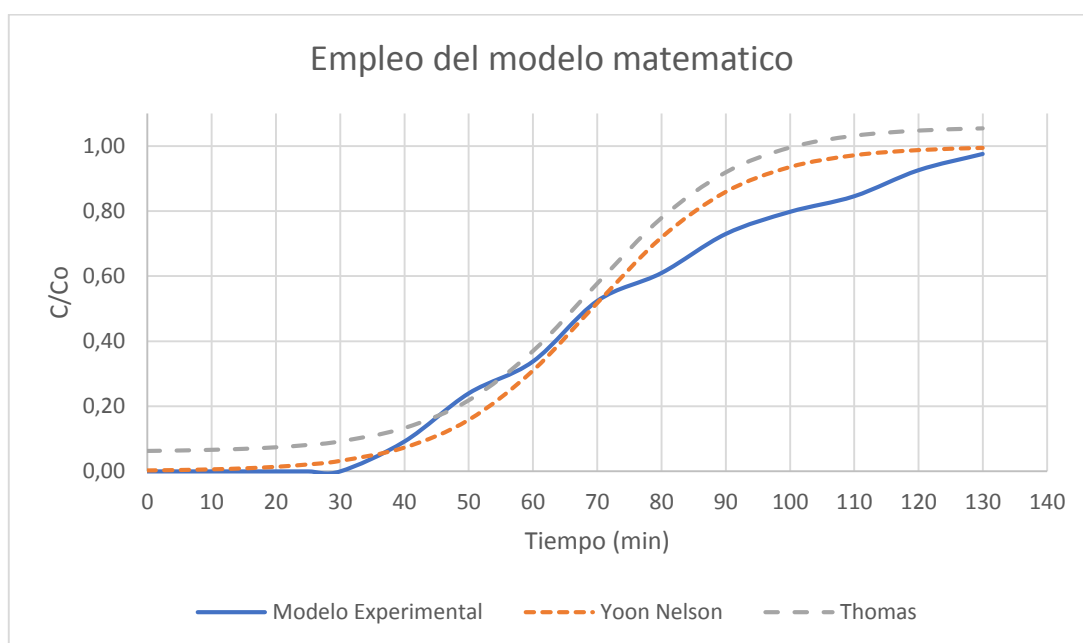


Figura 15: Curva experimental (Q1 1,5 ml/min) vs modelos matemáticos

Fuente: (Autores)

Las curvas obtenidas se muestran en la figura 15, los datos representados en la tabla 14, muestran que el coeficiente de correlación es muy similar en cuanto los modelos matemáticos empleados, (Calero et al., 2012) sin embargo el porcentaje de error es mucho mayor para el modelo de Thomas, demostrando así que el modelo que mejor se adapta a



la curva de ruptura es el modelo de Yoon Nelson. Al igual que en la adsorción de la Ciprofloxacina, esto indica que la velocidad del proceso baja al saturarse los sitios activos.

*Tabla 14 Constantes de los modelos matemáticos empleados en el estudio de la influencia del caudal para Sulfametoxazol
Fuente: (Autores)*

Columna	Modelos	Constantes de los modelos matemáticos			
		KYN	KTH	R2	Error %
1	Yoon Nelson	0,025	-----	0,875	14,110
	Thomas	-----	2,879	0,860	19,520

3.1.3.2. Estudio del efecto de la altura

Se variará la altura del lecho manteniendo constantes los demás parámetros, de la columna 1, con diámetro de columna 1,50 cm, caudal de 1,50 ml/min, pH de 6,00 y concentración de 5,00 ppm, los datos son presentados en la tabla 15.

*Tabla 15: Estudio del efecto de la altura en columnas de lecho fijo h1) Altura 1 h2) Altura 2
Fuente: (Autores)*

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Caudal	Q	1,50	ml/min
Masa del adsorbente	m1	3,00	g
	m2	5,00	
Altura del lecho	h1	12,00	cm
	h2	20,00	
Concentración inicial	Co	5,00	ppm
Tiempo	t	110,00	min

En la figura 16 se muestra el comportamiento de la columna con los datos de la tabla 15.

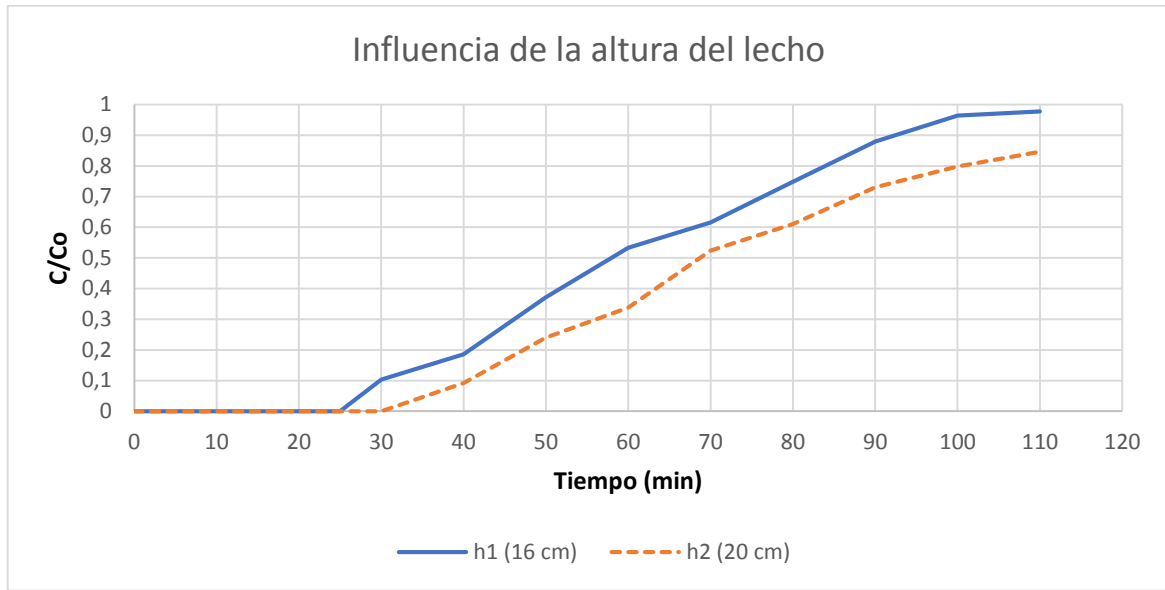


Figura 16: Comparación de alturas en un sistema mono-componente para el bagazo de caña
Fuente: (Autores)

Los resultados obtenidos con el sulfametoxazol al variar la altura del lecho, son los mismos que los obtenidos con la adsorción de la ciprofloxacina sobre bagazo de caña de azúcar. El tiempo de punto de ruptura aumentó al aumentar la altura del lecho de 16,00 cm a 20,00 cm (Pachathu, A., Ponnusamy, K., & Srinivasan, 2016) como se muestra en la tabla 16. La capacidad de eliminación de la columna aumentó de 0,600 mg/g a 1,021 mg/g. Lo que indica la influencia que tiene la altura de lecho en el proceso de adsorción usando el bagazo de caña de azúcar, este resultado sugiere claramente que mientras más masa de adsorbente se usa, se puede lograr una mayor adsorción, sin embargo, aunque no es significativo, el porcentaje de lecho no utilizado es mayor.

Tabla 16: Parámetros de las curvas de ruptura con variación de alturas para la adsorción de Sulfametoxazol con bagazo de caña como biosorbente:

Fuente: (Autores)

Altura del lecho (cm)	Tiempo de ruptura (min)	LUB	%LUB	W sat	W b
16,000	30,000	5,800	36,251	0,019	0,600
20,000	40,000	6,558	40,989	0,033	1,021

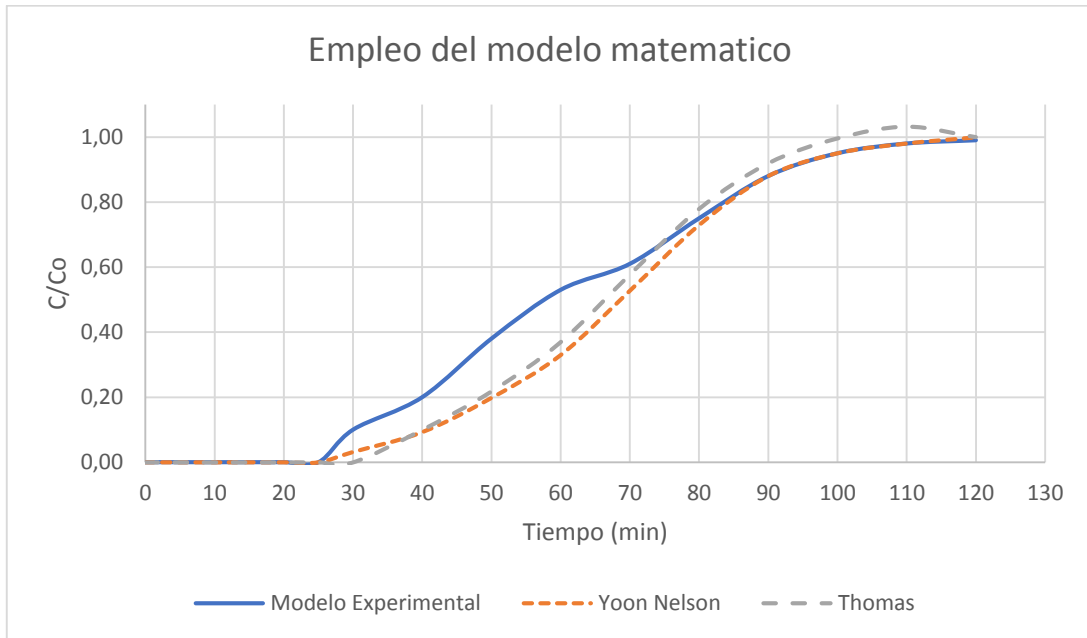


Figura 17: Curva experimental (h_1 16cm) vs modelo matemático de Yoon Nelson
Fuente: (Autores)

Según las curvas de la figura 17 se obtuvieron los datos representados en la tabla 15, en base a dichos resultados se puede observar que el coeficiente de correlación es muy similar en cuanto los modelos matemáticos empleados, (Calero et al., 2012) sin embargo el porcentaje de error es mucho mayor para el modelo de Thomas, demostrando así que el modelo que mejor se adapta a la curva de ruptura es el modelo de Yoon Nelson

Tabla 17 Constantes de los modelos matemáticos empleados en el estudio de la altura del lecho para Sulfametoxazol

Columna	Modelos	Constantes de los modelos matemáticos			
		KYN	KTH	R2	Error %
1	Yoon Nelson	0,015	-----	0,884	20,450
	Thomas	-----	1,962	0,866	24,770

3.1.3.3. Estudio del efecto de la concentración

Se variará la concentración inicial manteniendo constantes los demás parámetros, de la columna 1, con diámetro de columna 1,50 cm, caudal de 3,00 ml/min, pH de 6,00; y 2,00 g de biosorbente, los datos son presentados en la tabla 18.



Tabla 18: Estudio del efecto de la concentración en columnas de lecho fijo Co1) Concentración inicial 1 Co2)
Concentración inicial 2
Fuente: (Autores)

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Caudal	Q	2,50	ml/min
Masa de adsorbente	m	4,00	g
Altura del lecho	h	16,00	cm
Concentración inicial	Co1	9,00	ppm
	Co2	11,00	
Tiempo	t	80,00	min

En la figura 18 se muestra el comportamiento de la columna con los datos de la tabla 18.

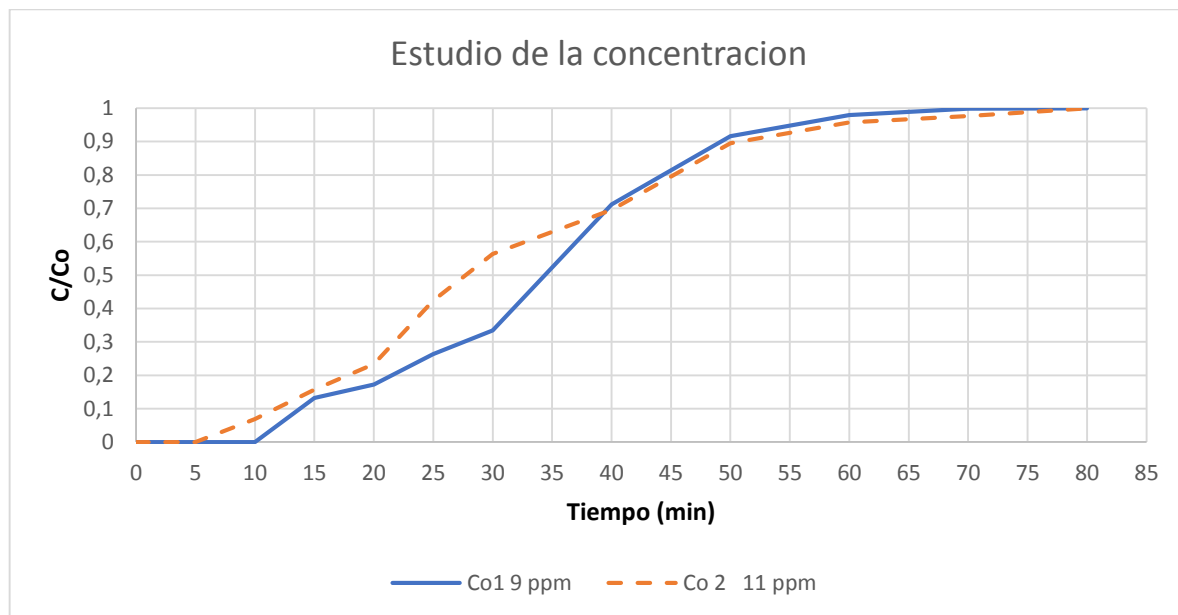


Figura 18: Comparación de concentraciones en un sistema mono-componente para el bagazo de caña
Fuente: (Autores)

De manera similar que, en el estudio de la influencia de la concentración de Ciprofloxacina, el tiempo de punto de ruptura disminuye al aumentar la concentración de 9,00 ppm a 11,00 ppm como se muestra en la tabla 19. El punto de saturación al 100% aumenta cuando se aumenta la concentración. La capacidad de eliminación de la columna aumento de 0,250 mg/g a 0,290 mg/g. Este aumento en la capacidad de sorción se puede deber a que la mayor concentración de Sulfametoxazol tienda a una saturación más rápida del biosorbente. El aumento de la concentración también disminuye el porcentaje del lecho no

utilizado, lo que contribuye al aumento de la capacidad de adsorción e influye en la eficiencia de la columna. (Tian, Yuan; Gao, Bin; Morales, Verónica; Chen, Hao; Wang, Yu; Li, 2013) & (Sadaf & Bhatti, 2014) (S & C, 2013)

Tabla 19: Parámetros de las curvas de ruptura con variación de concentraciones para la adsorción de Sulfametoxazol con bagazo de caña como biosorbente
Fuente: (Autores)

Concentración inicial (ppm)	Tiempo de ruptura (min)	LUB	%LUB	W sat	W b
9,000	14,000	9,579	58,872	0,041	0,250
11,000	12,000	8,499	53,119	0,063	0,290

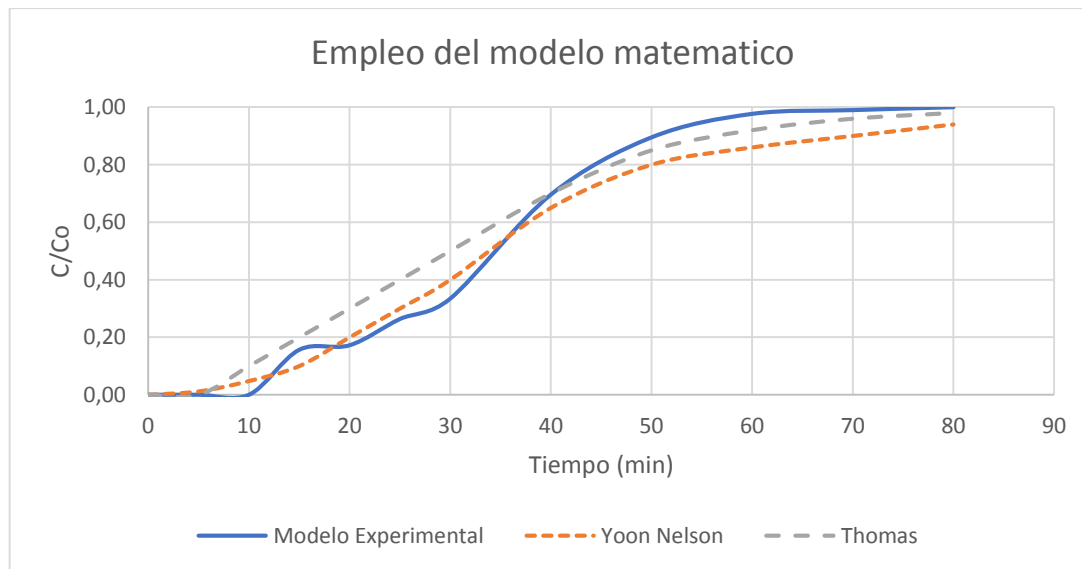


Figura 19: Curva experimental (Co_2 11 ppm) vs modelo matemático de Yoon Nelson
Fuente: (Autores)

Según las curvas de la figura 19 se obtuvieron los datos representados en la tabla 18, en base a dichos resultados se puede comprobar que el coeficiente de correlación es muy similar en cuanto los modelos matemáticos empleados, (Calero et al., 2012) demostrando así que el porcentaje de error es mayor para el modelo de Thomas, como en el caso de la Ciprofloxacina, adaptándose de una mejor manera el modelo de Yoon Nelson.



Tabla 20 Constantes de los modelos matemáticos empleados en el estudio de la concentración para Sulfametoxazol

Fuente: (Autores)

Columna	Modelos	Constantes de los modelos matemáticos			
		KYN	KTH	R2	Error %
1	Yoon Nelson	0,023	-----	0,946	14,440
	Thomas	-----	2,543	0,929	24,430

3.2 Criterios de escalado

Para la aplicación del escalado se tomaron en cuenta las columnas del Centro de estudios ambientales (Columna 1) dicha columna tiene un diámetro de 1,50 cm y una altura de 50 cm y las columnas del laboratorio de operaciones unitarias del Tecnológico, (Columna 2), dicha columna cuenta con un diámetro de 2,20 cm, y una altura de 35 cm.

3.2.1 Escalado en columnas con bagazo de caña

Para el escalado se emplearon columnas de 1,50 cm de diámetro y 50,00 cm de altura vs columnas de 2,20 cm de diámetro y 30,00 cm de altura.

3.2.1.1 Escalado empleando el fármaco Ciprofloxacina

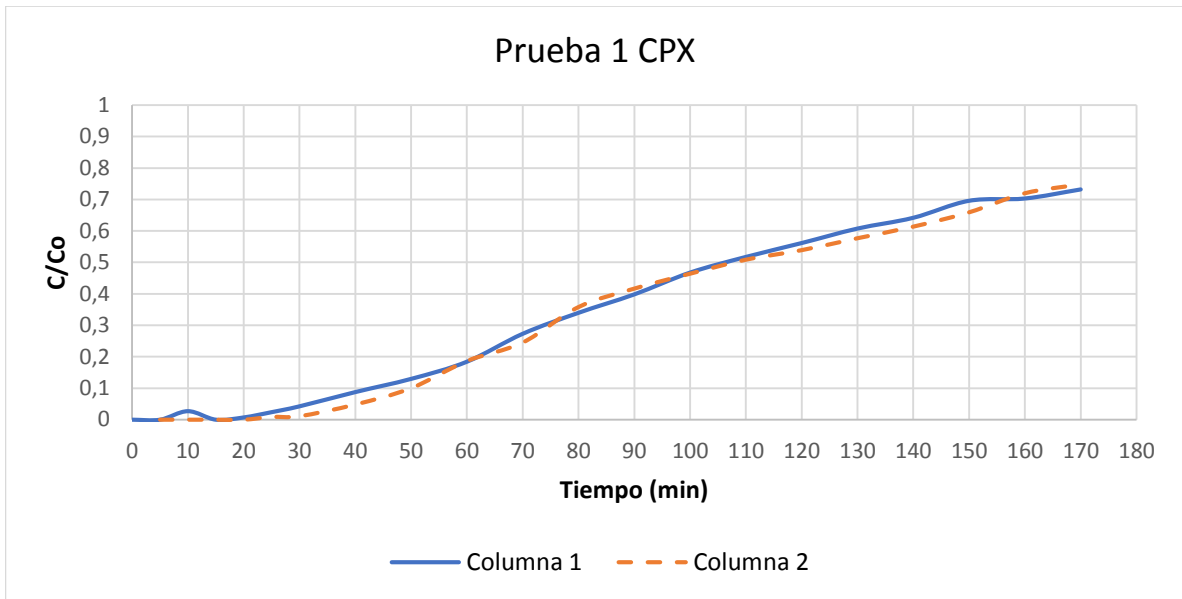
Tabla 21: Condiciones de escalado para las columnas con Ciprofloxacina 10 ppm

Fuente: (Autores)

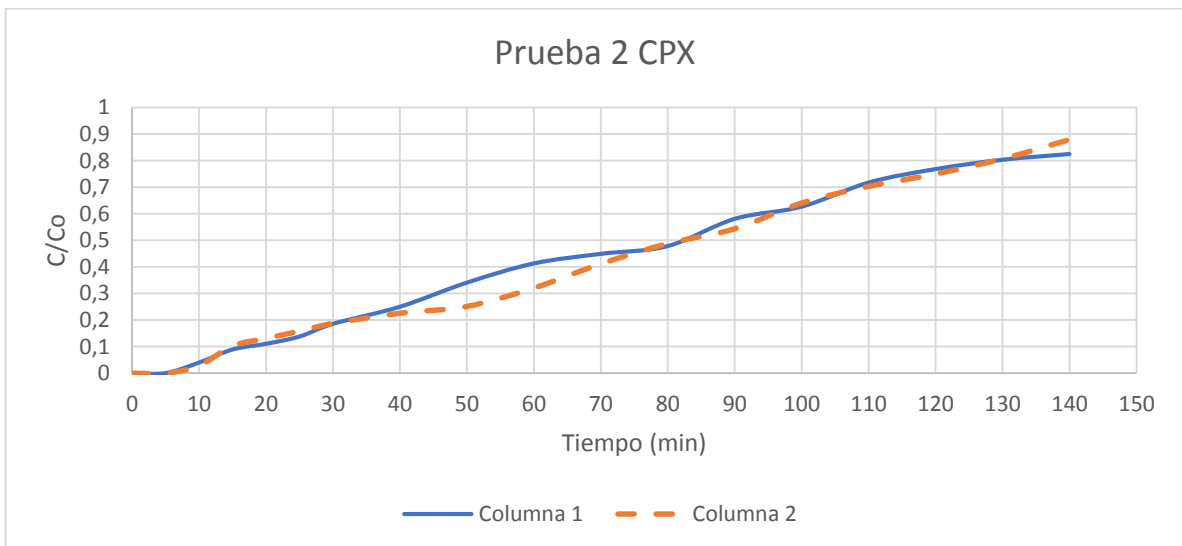
Parámetros	Prueba 1		Prueba 2	
	Columna 1	Columna 2	Columna 1	Columna 2
Diámetro (cm)	1,50	2,20	1,50	2,20
Masa (g)	1,00	2,00	1,50	3,0
Altura (cm)	4,00	5,86	6,00	8,80
Área	1,76	3,80	1,76	3,80
Caudal (ml/min)	3,00	6,50	3,00	6,50
Relación H/D	2,67	2,67	4,00	4,00
Velocidad	1,70	1,71	1,70	1,71
Densidad del lecho (g/ml)	0,14	0,14	0,14	0,14
Concentración inicial (ppm)	10,00	10,00	10,00	10,00



En la tabla número 21 se puede apreciar las condiciones de escalado empleadas para las distintas columnas.



(a)



(b)

Figura 20: Comparación de las columnas en un sistema mono-componente para el bagazo de caña a) Prueba 1 b) Prueba 2
Fuente: (Autores)



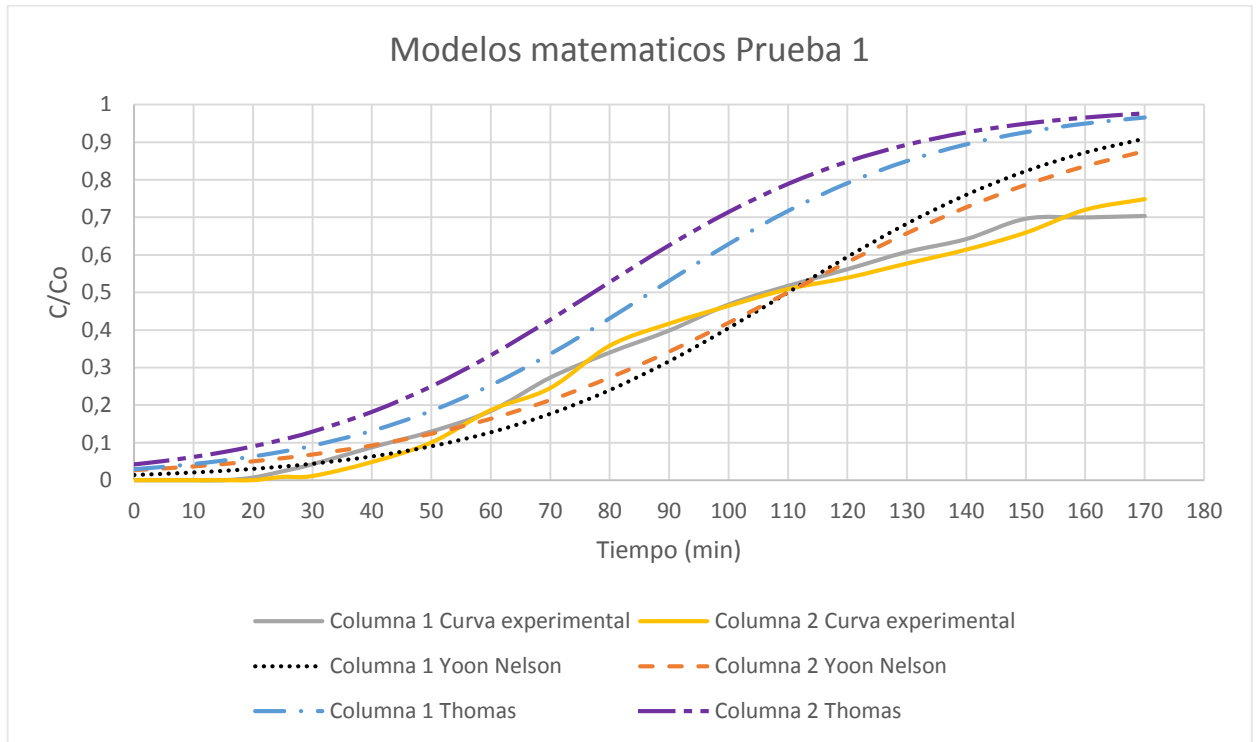
Como se puede observar en la figura 20, en base a los criterios de escalado empleados se aprecia que los datos de concentraciones finales obtenidos, tanto para las columnas 1 como para las columnas 2 son similares, demostrando así que se puede hacer un escalado para columnas manteniendo constante la velocidad del flujo en el lecho.

En la tabla 21 se puede notar que la relación H/D y la velocidad, tanto para la prueba 1 y 2 se mantienen constantes de la columna 1 a 2 indicando que existe una similitud geométrica y cinemática correcta.

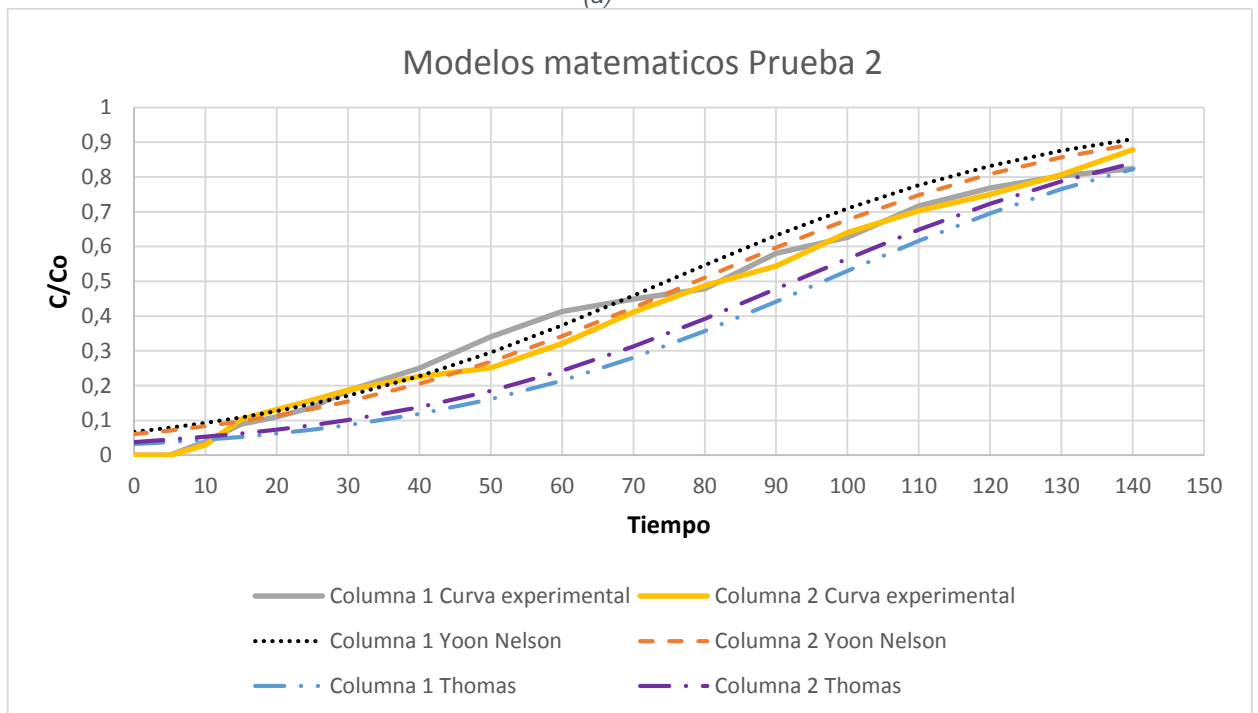
*Tabla 22: Parámetros de las curvas de ruptura en el escalado para la adsorción de Ciprofloxacina con bagazo de caña como biosorbente
Fuente: (Autores)*

Parámetro	Prueba 1		Prueba 2	
	Columna 1	Columna 2	Columna 1	Columna 2
Tiempo de ruptura (min)	40,020	49,010	14,220	16,360
W sat (mgsoluto/gbagazo)	2,799	2, 228	2, 837	2,297
Wb (mgsoluto/gbagazo)	1,045	0,857	0,985	0,836
LUB (cm)	2,462	3,672	2,544	3,798
% LUB	61,550	62,669	63,601	63,999

Como se puede observar en la ilustración 20, la forma de las curvas son similares como también los valores de la tabla 22, pero dichos valores muestran una diferencia entre las dos columnas ya que el punto de ruptura es mayor y la capacidad de sorción menor en la columna 2 que en la columna 1, dado que a medida que las dimensiones de la columna aumentan, el tiempo de ruptura (t_b) aumentara y la capacidad de eliminación de la columna disminuirá (W_b y W_{sat}), esto coincide con lo estudiado por (Vilardi, Di Palma, & Verdone, 2019).



(a)



(b)

Figura 21: Comparación de escalado empleando los modelos matemáticos en un sistema mono-componente para el bagazo de caña a) Prueba 1 b) Prueba 2



Fuente: (Autores)

Como se puede observar en la figura a) y b) 21, los resultados obtenidos para los modelos matemáticos de Yoon Nelson, y el modelo de Thomas, no son exactamente iguales, sin embargo, corresponden a los resultados obtenidos para las curvas experimentales, lo cual nos indica un punto de ruptura cercano y tiempos de trabajo y operación semejantes corroborando además los datos de LUB y % de lecho no utilizado presentados en la tabla 22.

3.2.1.2 Escalado empleando el fármaco Sulfametoxazol

Para el escalado de Sulfametoxazol se trabajó de igual manera que la Ciprofloxacina respecto a columnas. En el siguiente estudio se presentará 2 pruebas de escalado para dicho fármaco.

Tabla 23: Condiciones de escalado para las columnas con Sulfametoxazol
Fuente: (Autores)

Parámetros	Prueba 1		Prueba 2	
	Columna 1	Columna 2	Columna 1	Columna 2
Diámetro (cm)	1,50	2,20	1,50	2,20
Masa (g)	4,00	13,00	4,00	13,00
Altura (cm)	16,00	23,50	16,00	23,50
Área (cm²)	1,76	3,80	1,76	3,80
Caudal (ml/min)	1,50	3,30	2,50	5,50
Relación H/D	10,67	10,68	10,67	10,68
Velocidad (cm/min)	0,85	0,86	1,42	1,44
Densidad del lecho (g/ml)	0,14	0,14	0,14	0,14
Concentración inicial (ppm)	5,00	5,00	5,00	5,00

En la tabla número 23 se puede apreciar las condiciones de escalado empleadas para las distintas columnas.

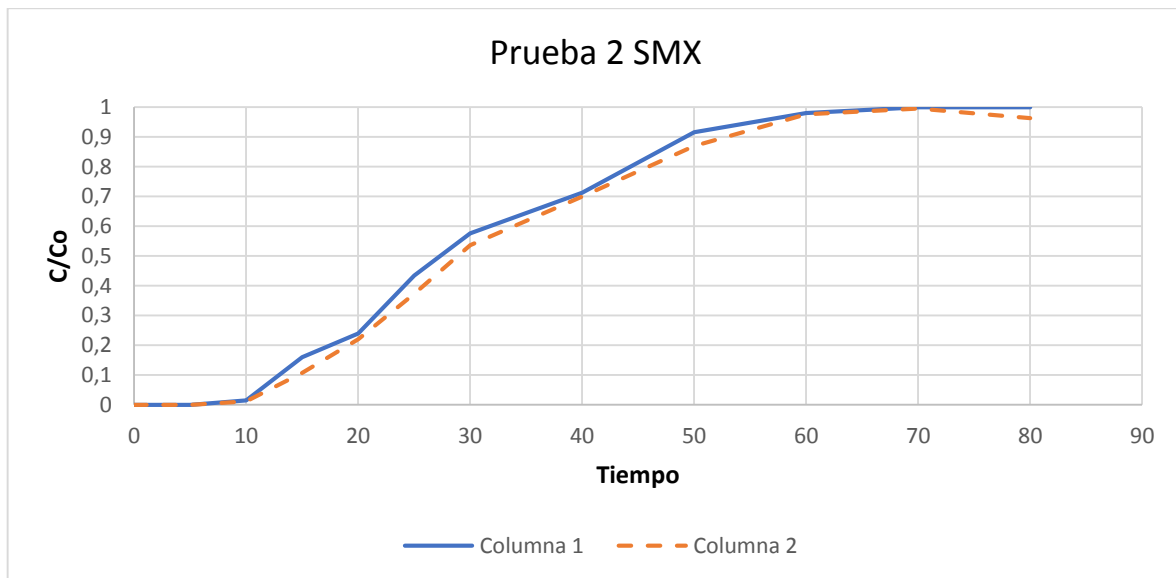
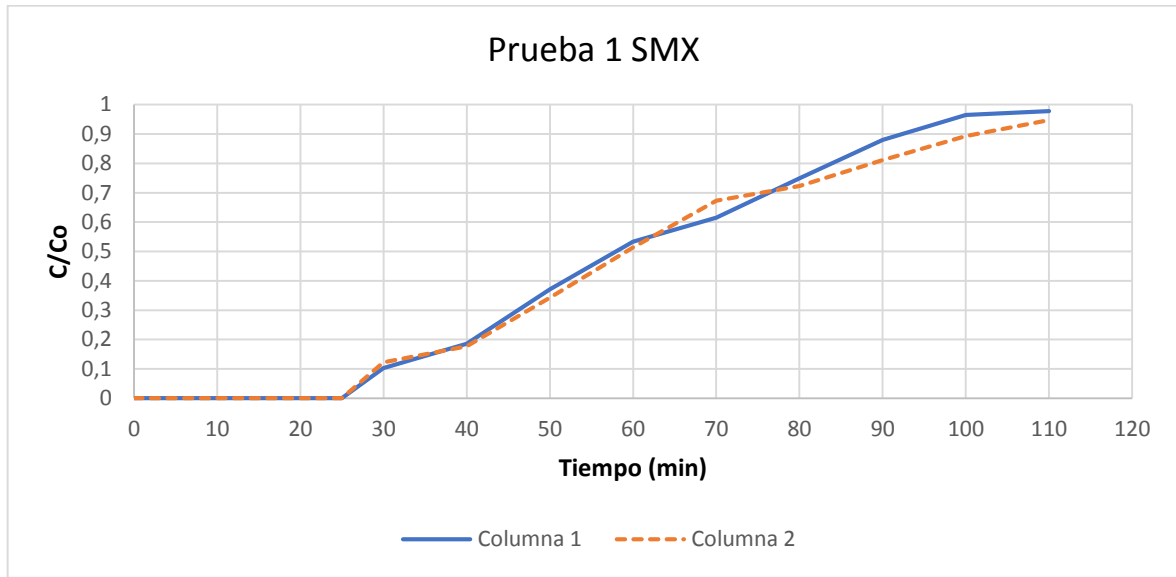


Figura 22: Comparación de las columnas en un sistema mono-componente para el bagazo de caña a) Prueba 1 b) Prueba 2
Fuente: (Autores)

Como se puede observar en la figura a) y b) 22, basándonos en los criterios de escalado, las concentraciones finales tanto para la columna 1 y 2 son similares, donde esta similitud indica que se puede hacer un escalado donde la velocidad de flujo debe ser constante.

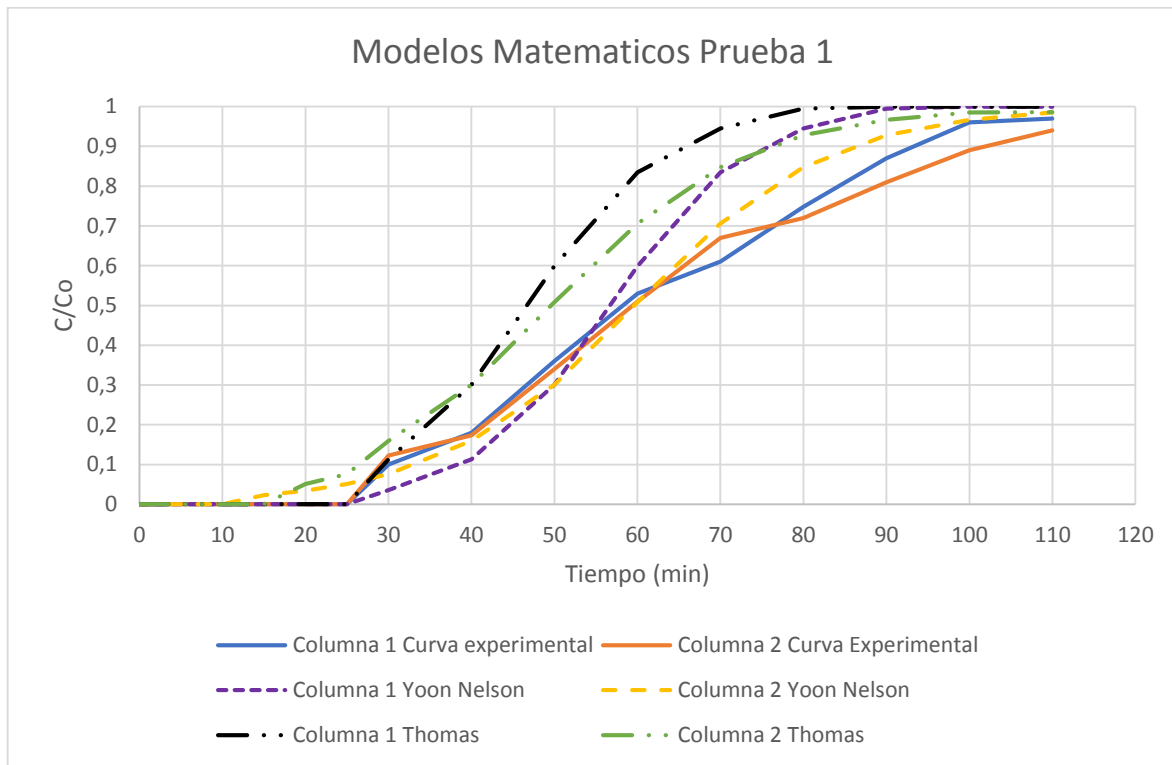


En la tabla 23, de la misma manera como el estudio de escalado de CPX, para el SMX la relación H/D y la velocidad, tanto para la prueba 1 y 2 se mantienen constantes de la columna 1 a 2 indicando que existe una similitud geométrica y cinemática correcta.

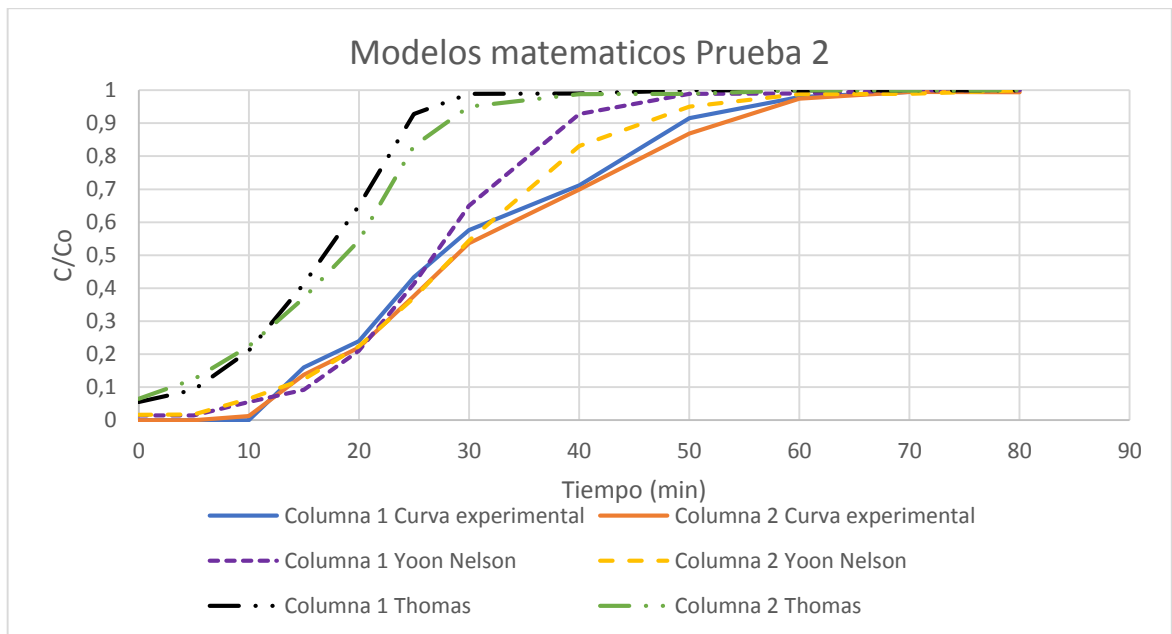
Tabla 24: Parámetros de las curvas de ruptura en el escalado para la adsorción de Sulfametoxazol con bagazo de caña como biosorbente
Fuente: (Autores)

Parámetro	Prueba 1		Prueba 2	
	Columna 1	Columna 2	Columna 1	Columna 2
Tiempo de ruptura (min)	29,280	30,310	11,360	12,100
W sat (mgsoluto/gbagazo)	0,035	0,011	0,055	0,019
Wb (mgsoluto/gbagazo)	0,018	0,006	0,026	0,009
LUB (cm)	7,846	11,962	7,894	12,378
% LUB	49,036	50,904	49,342	52,670

En la Figura 22, de manera similar que en el estudio de escalado de la Ciprofloxacina la forma de las curvas son similares como también los valores presentados en la tabla 24, estos valores muestran una diferencia entre las dos columnas, el punto de ruptura es mayor y la capacidad de sorción menor en la columna 2 que en la columna 1, razón por la que a medida que las dimensiones de la columna aumentan, el tiempo de ruptura (tb) aumentara y la capacidad de eliminación de la columna disminuirá (Wb y Wsat), coincidiendo con lo estudiado por (Vilardi, Di Palma, & Verdone, 2019).



(a)



(b)

Figura 23: Comparación de escalado empleando los modelos matemáticos en un sistema mono-componente para el bagazo de caña



En la figura 23 se representan las curvas del escalado junto a sus modelos matemáticos de Yoon Nelson y Thomas, donde se ve una similitud bastante acertada en comparación con las curvas experimentales por parte del modelo matemático de Yoon Nelson y una alejada por Thomas, los resultados simulados en los modelos no son exactos pero el punto de ruptura es bastante cercano al de la curva experimental.

3.3 Estudio comparativo de la biosorción de Ciprofloxacina y Sulfametoxazol utilizando Bagazo de Caña como Biosorbente

En el siguiente estudio se realizó la comparación de adsorción de los fármacos Ciprofloxacina y Sulfametoxazol utilizando para ambos casos Bagazo de Caña como biosorbente.

Tomando a consideración los estudios antes mencionados de la evaluación de la influencia del caudal y altura del lecho tanto para CPX y SMX, se realizó la prueba para el Sulfametoxazol con mayor masa de biosorbente y menor caudal, presentando de esta manera mejores condiciones de adsorción para el SMX, sin embargo la afinidad del bagazo de caña por dicho fármaco es mucho menor, presentando así las curvas de ruptura según la ilustración 24.

En la tabla 25 se presentan los parámetros establecidos para el estudio, siendo la prueba 1 para la Ciprofloxacina y la 2 para el Sulfametoxazol.

Tabla 25 Condiciones de las curvas de ruptura para la comparación de la adsorción entre CPX y SMX

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Caudal	Q1	3,00	ml/min
	Q2	2,50	
Masa	m1	2,00	g
	m2	4,00	
Altura	h1	8,30	cm
	h2	16,00	
Concentración inicial	Co	10,00	ppm

En la ilustración 24 se presentan las curvas tanto para CPX (Ciprofloxacina) y SMX (Sulfametoxazol) con Bagazo de caña:

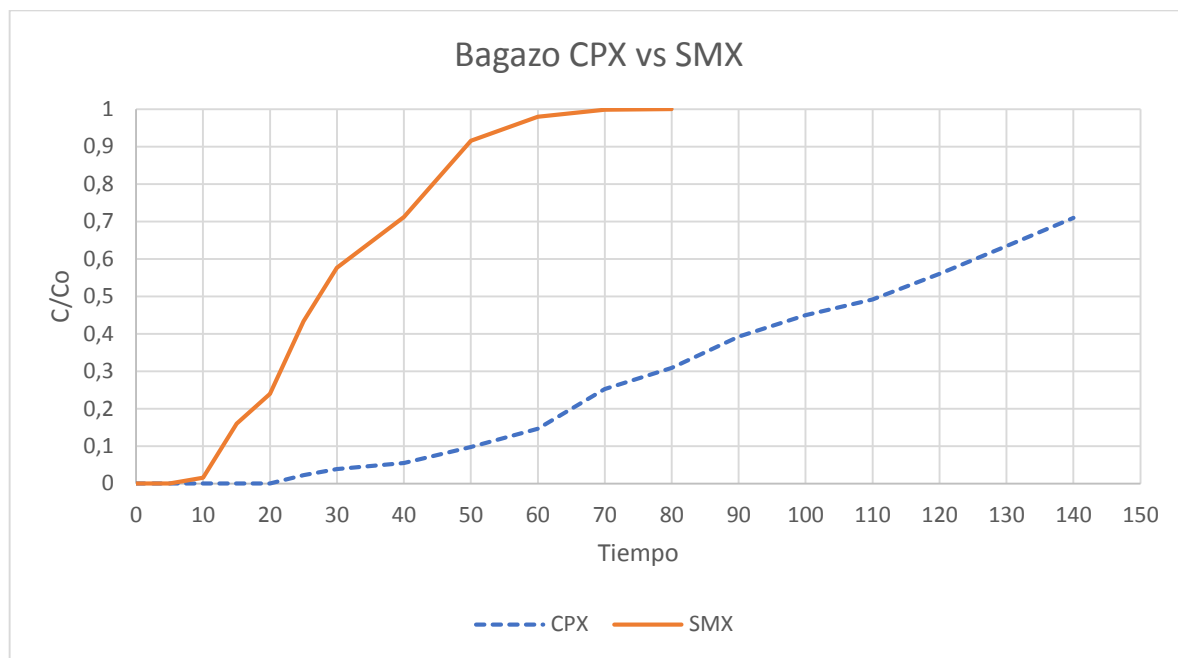


Figura 24 Curvas de ruptura de la comparación de la adsorción de los fármacos CPX y SMX al usar Bagazo de Caña como biosorbente

Fuente: (Autores)

En la figura 24 muestra:

1. La curva de ruptura del Sulfametoxazol es elevada, acercándose más a una curva ideal, sin embargo, los resultados muestran un menor porcentaje de lecho utilizado para el Sulfametoxazol, debido seguramente a la menor afinidad que existe entre este fármaco y la biomasa, lo que se refleja a la vez en la baja capacidad de adsorción, a pesar de tener una mayor cantidad de masa de adsorbente.
2. El punto de ruptura o tiempo de ruptura es mucho menor para la curva del Sulfametoxazol, lo que indica que, si bien el lecho no está saturado debido que existe gran cantidad de adsorbente no utilizado, el adsorbente es incapaz de adsorber más, este resultado es parecido a lo obtenido en el proceso de adsorción el batch, realizado por el Centro de Estudios Ambientales dentro del proyecto de



contaminantes emergentes (Peñafiel, M, E; Vanegas, M, E; Bermejo, D; Matezans, J, M; Ormad, M, 2019)

3. La cantidad de solución que se puede tratar es mayor para la Ciprofloxacina que para el Sulfametoxazol, utilizando menor cantidad de biomasa, esto es debido a la mejor afinidad de la Ciprofloxacina con el bagazo.

*Tabla 26 Parámetros obtenidos de la curva de ruptura de la comparativa de adsorción entre CPX y SMX
Fuente: (Autores)*

Fármacos	Tiempo de ruptura (min)	LUB	%LUB	W sat	W b
CPX	51,000	3,841	46,278	0,539	0,727
SMX	12,930	8,428	52,672	0,055	0,026

3.4 Estudio comparativo de Biosorbentes Bagazo de caña y Mazorca de Maíz al adsorber Ciprofloxacina y Sulfametoxazol

3.4.1 Comparación al utilizar Ciprofloxacina (CPX)

En el siguiente estudio se realizó una comparación de la adsorción del fármaco Ciprofloxacina, donde se trabajó con Bagazo de caña y Mazorca de Maíz manteniendo todos los parámetros iguales para los dos biosorbente.

En la siguiente tabla se presentan los parámetros que se establecieron para el estudio, donde se denomina como M a la prueba de la Mazorca de maíz y B a la del Bagazo de caña.

*Tabla 27: Condiciones de la curva de ruptura para la comparativa de biosorbentes para CPX M) Mazorca B) Bagazo
Fuente: (Autores)*

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Caudal	Q	3,00	ml/min
Masa del adsorbente	mM	2,00	g
	mB	2,00	
Altura del lecho	hM	8,30	cm
	hB	8,30	
Concentración inicial	Co	10,00	ppm
Tiempo	tM	200,00	min
	tB	140,00	

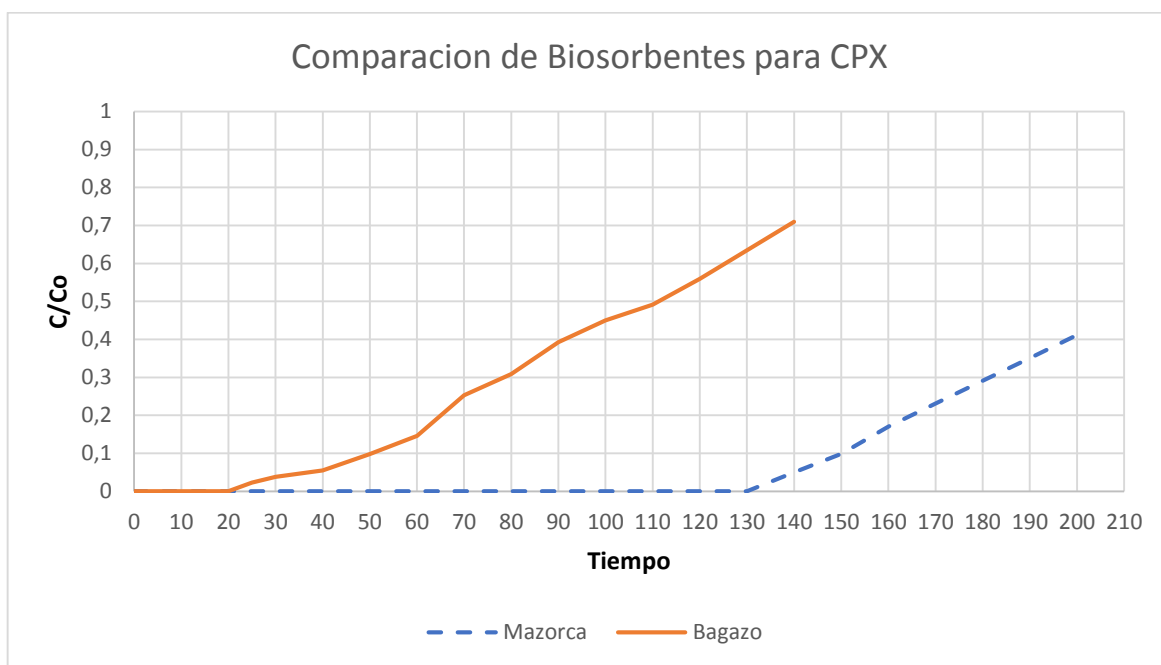


Figura 25 Curvas de ruptura de la comparación de Biosorbentes para CPX

Fuente: (Autores)

En la figura 25. Se encuentran representadas las curvas de ruptura tanto para la mazorca y bagazo, donde se observa que el punto de ruptura al usar mazorca es superior que del bagazo, se va un aumento de la capacidad de eliminación de CPX al utilizar Mazorca de Maíz pasando de 0,727 mg/g del bagazo a 1,245 mg/g con el maíz, estos valores se presentan en la tabla 28. Con el uso de mazorca de maíz como biosorbente que el porcentaje del lecho no utilizado disminuya, lo que el CPX tiene más afinidad de adsorberse en Mazorca de Maíz que en Bagazo de Caña.

Tabla 28 Parámetros obtenidos de las curvas de ruptura pertenecientes a la comparación de Biosorbentes para CPX

Fuente: (Autores)

Biosorbente	Tiempo de ruptura (min)	LUB	%LUB	W sat	W b
Bagazo	51,000	3,841	46,278	0,539	0,727
Mazorca	150,000	2,490	30,067	1,039	1,245



3.4.2 Comparación al utilizar Sulfametoxazol (SMX)

En el siguiente estudio se realizó una comparativa de la adsorción del fármaco Sulfametoxazol trabajando con Bagazo de caña y Mazorca de Maíz, manteniendo todos los parámetros iguales caudal, altura del lecho y concentración al usar los dos biosorbentes.

En la tabla 29 se presentan los parámetros que se estableció para el estudio, donde se denomina como M a la prueba de la Mazorca de maíz y B a la del Bagazo de caña.

*Tabla 29 Condiciones de la Curva de ruptura para la comparativa de Biosorbentes para SMX
Fuente: (Autores) M) Maíz B) Bagazo.*

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
Caudal	Q	1,50	ml/min
Masa del adsorbente	mM	5,00	g
	mB	5,00	
Altura del lecho	hM	20,00	cm
	hB	20,00	
Concentración inicial	Co	5,00	ppm
Tiempo	tM	100,00	min
	tB	130,00	

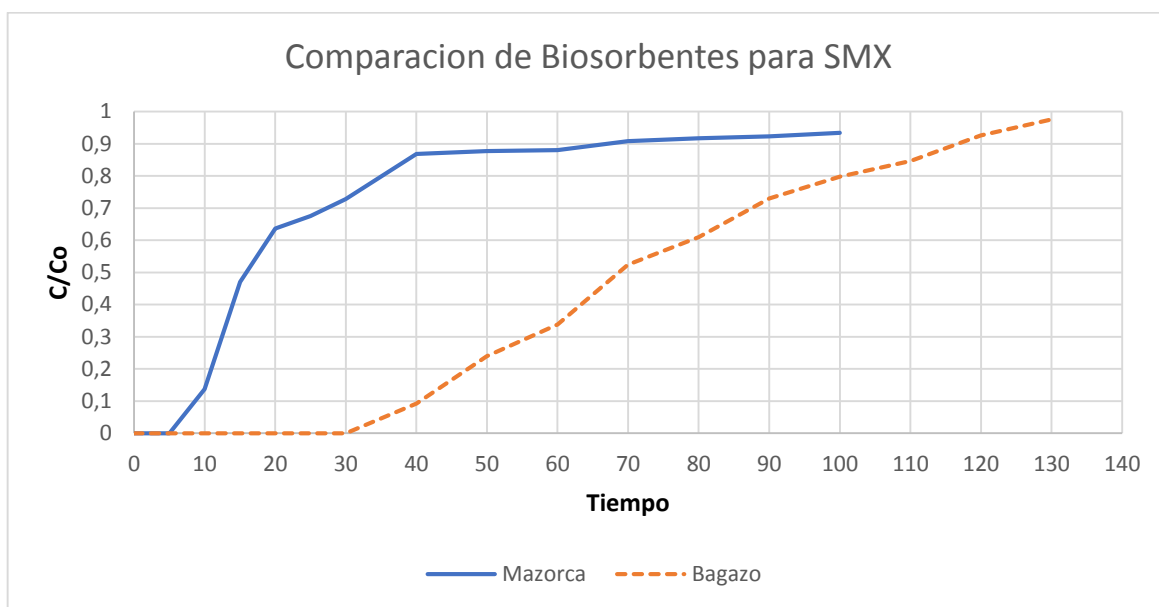


Figura 26 Curvas de ruptura de la comparación de Biosorbentes para SMX

Fuente: (Autores)

En la Figura 26. Se encuentran representadas las curvas de ruptura tanto para la mazorca y bagazo, donde se observa que el punto de ruptura al usar mazorca es inferior que, del bagazo, tomando en cuenta que se trabajó en las mismas condiciones. Se nota una disminución de la capacidad de eliminación al utilizar Mazorca de Maíz de 0,019 mg/g a 0,004 mg/g valores presentados en la tabla 30. En este caso el porcentaje de lecho no utilizado aumenta, esto sugiere menos afinidad entre el Sulfametoxazol y el maíz, resultados que ya fueron observados en los estudios en batch realizados en el CEA.

Tabla 30 Parámetros obtenidos de las curvas de ruptura pertenecientes a la comparación de Biosorbentes para SMX

Fuente: (Autores)

Biosorbente	Tiempo de ruptura (min)	LUB	%LUB	W sat	W b
Bagazo	40,540	6,559	40,989	0,033	0,019
Mazorca	8,630	7,316	45,723	0,008	0,004



Conclusiones

- En el estudio de la influencia del caudal tanto para Ciprofloxacina y Sulfametoxazol, el parámetro del caudal de entrada a la columna influye en la adsorción de estos dos fármacos al utilizar Bagazo de Caña como biosorbente, para los dos casos el aumento de caudal hace que el punto de ruptura y el de saturación se presenten en un menor lapso de tiempo y a menor caudal en un mayor lapso de tiempo, la capacidad de eliminación del fármaco disminuye por tener un menor tiempo de contacto Fármaco-Biosorbente.
- La masa del biosorbente está relacionada directamente con la altura del lecho ya que a mayor masa del biosorbente mayor altura presentara el lecho en la columna, por lo cual en el estudio de la influencia de altura del lecho utilizando Bagazo de Caña para los dos fármacos el comportamiento de la curva de ruptura es similar ya que al tener una mayor altura de lecho en la columna el punto de ruptura y el de saturación se presentarán en un mayor lapso de tiempo y la capacidad de eliminación de los dos fármacos aumenta.
- En el estudio de la influencia de la concentración inicial del fármaco en la solución al utilizar Bagazo de Caña como biosorbente, en los dos fármacos el comportamiento es similar, cuando mayor concentración inicial del fármaco posee la solución el punto de ruptura se presentará en un menor lapso de tiempo, sin embargo, el punto de saturación al 100% se presentará en un mayor lapso de tiempo. La capacidad de eliminación aumenta al aumentar la concentración de los fármacos. Una diferencia notable en las curvas de ruptura de este estudio entre los dos fármacos, está en el comportamiento de las curvas referente a los puntos de ruptura y saturación, ya que para el Sulfametoxazol estos puntos tienen valores casi iguales de lo contrario sucede para la Ciprofloxacina estos valores son más diferenciables.
- El modelo que mejor se adapta al proceso de adsorción en columnas de lecho fijo utilizando Bagazo de Caña, tanto para Ciprofloxacina y Sulfametoxazol fue el de Yoon y Nelson ya que describe el comportamiento de una manera correcta, al presentar un menor error porcentual, esto es debido a su mejor adaptación a sistemas monocomponente, además de la clara desventaja del modelo de Thomas



al únicamente tomar en cuenta el régimen de transferencia de masa, sin tomar en cuenta las interacciones químicas entre adsorbato y adsorbente.

- Al realizar el “Escalado” para los dos fármacos en una columna con mayor diámetro, el comportamiento que presenta la curva de ruptura con la columna de menor diámetro son similares, teniendo en cuenta el parámetro de las curvas de ruptura %LUB el cual tiene un valor muy aproximado entre las dos columnas, indica que la adsorción en dichas columnas se da de manera similar, sin embargo, a mitad que la escala aumenta, la capacidad de adsorción disminuye, y el punto de ruptura aumenta.
- Al utilizar Bagazo de caña como biosorbente en columnas de lecho fijo, se adsorbe de una mejor manera la Ciprofloxacina que el Sulfametoxazol.
- El estudio comparativo de Biosorbentes indica que al mantener las mismas condiciones en la adsorción de Ciprofloxacina la Mazorca de Maíz adsorbe de una mejor manera dicho fármaco que el Bagazo de Caña y para el Sulfametoxazol ocurre lo contrario donde se adsorbe mejor con Bagazo de Caña.

Recomendaciones:

- Ampliar los estudios de adsorción empleando mazorca de maíz como biosorbente.
- Realizar una investigación de los grupos funcionales implicados en el proceso de biosorción de ciprofloxacina y sulfametoxazol
- Realizar un estudio de influencia de Caudal, altura del lecho y concentración inicial para la Mazorca de Maíz utilizando Ciprofloxacina ya que es más eficiente que el Bagazo de Caña con dicho fármaco
- Realizar estudios para la adsorción de otros fármacos contaminantes utilizando los mismos biosorbentes.
- Buscar alternativas para la disposición final del Bagazo de Caña y la Mazorca de Maíz saturados.



Bibliografía

- Acheampong, M. A., Pakshirajan, K., Annachhatre, A. P., & Lens, P. N. (2013). *Removal of Cu(II) by biosorption onto coconut shell in fixed-bed column systems. Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. . 841-848.
- Boada, P. *ESTUDIO DEL PROCESO DE BIOSORCIÓN DE CONTAMINANTES EN EFLUENTES ACUOSOS MEDIANTE CILANTRO.* , (2015).
- Bueno, M. J. M., Gomez, M. J., Herrera, S., Hernando, M. D., Agüera, A., & Fernández-Alba, A. R. (2012). Occurrence and persistence of organic emerging contaminants and priority pollutants in five sewage treatment plants of Spain: Two years pilot survey monitoring. *Environmental Pollution*, 164, 267–273.
<https://doi.org/10.1016/j.envpol.2012.01.038>
- Calero, M., Blázquez, G., Hernáinz, F., Ronda, A., & Martín-Lara, M. A. (2012). Biosorción de cobre con corteza de pino en columna de lecho de fijo: Optimización de las variables del proceso. *Afinidad*, 69(559), 175–184. Retrieved from <http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84874531699&partnerID=tZOtx3y1>
- California Department of Pesticide Regulation. (2006). *Pesticidas*.
- Costa, A., Silva, S., & Campos, S. (2016). *PATRÓN DE RESISTENCIA A LA CIPROFLOXACINA EN LAS BACTERIAS AISLADAS DE PACIENTES CON INFECCIÓN DEL TRACTO URINARIO ADQUIRIDA POR LA COMUNIDAD*.
- De Souza, M. V. N., De Almeida, M. V, Da Silva, A. D., & Couri, M. R. C. (2004). Ciprofloxacina, uma importante fluorquinolona no combate ao antraz. *Rev. Bras. Farm*, 85(1), 13–18. Retrieved from http://rbfarma.org.br/files/pag_13a18.pdf
- Gonzales, D. (2010). *Analisis del error al aproximar la funcion factorial mediante la formula de stirling*. Retrieved from <https://steemit.com/stem-espanol/@ydavgonzalez/analisis-del-error-al-aproximar-la-funcion-factorial-mediante-la-formula-de-stirling>
- Gregori, M. (2014). *Estudio de la adsorción de fosfatos en aguas de depuradora mediante intercambio ionico*.



- Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía. (2008). *Biomasa Experiencias con biomasa agrícola y forestal para uso energético*.
- Izquierdo, M. (2010). *Eliminación de metales pesados en aguas mediante bioadsorción. Evaluación de materiales y modelación del proceso*.
- Janet Gil, M., María Soto, A., Iván Usma, J., & Darío Gutiérrez, O. (2012). *Emerging contaminants in waters: effects and possible treatments Contaminantes emergentes em águas, efeitos e possíveis tratamentos*. 7(2), 52–73. Retrieved from <http://www.scielo.org.co/pdf/pml/v7n2/v7n2a05.pdf>
- Khitous, M., Moussous, S., Selatnia, A., & Kherat, M. (2016). Biosorption of Cd(II) by *Pleurotus mutilus* biomass in fixed-bed column: experimental and breakthrough curves analysis. *Desalination and Water Treatment*, 57(35), 16559–16570. <https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1081625>
- Kumar, K. (2013). *Título: “ Modelación matemática del proceso de biosorción de Cromo +6 y Ni +2 : estudios en serie en columnas de lecho fijo con Bagazo de Caña de Azúcar. ”*
- Lara, José; Tejada, Candelaria; Villabona, Ángel; Arrieta, Alfonso; Conde, G. (2016). *Adsorción de plomo y cadmio en sistema continuo de lecho fijo sobre residuos de cacao*.
- Lopez, J., & Barcelo, D. (2008). (2008). *Contaminacion y calidad química del agua: El problema de los contaminantes químicos emergentes*.
- Maldonado, S. (2016). *UNIVERSIDAD AUTONÓMA DEL ESTADO DE MÉXICO FACULTAD DE QUÍMICA REMOCIÓN DE 17 β - ESTRADIOL EN MEDIO ACUOSO CON UNA ZEOLITA MODIFICADA CON HDTMA*.
- Martínez, E. (2006). *Situación actual de los contaminantes emergentes en las aguas*.
- Olivares, J. (2013). *PROCESO DINÁMICO PARA LA BIOSORCIÓN DE Pb (II) DE SOLUCIONES ACUOSAS UTILIZANDO UNA COLUMNA EMPACADA CON CÁSCARA DE PIMIENTA*. 1–101.
- Pachathu, A., Ponnusamy, K., & Srinivasan, S. (2016). *Packed bed column studies on the*



removal of emulsified oil from water using raw and modified bagasse and corn husk.
1256–1263.

PEDIAMECUM. (2015). *Sulfametoxazol*.

Peñafiel, M, E; Vanegas, M, E; Bermejo, D; Matezans, J, M; Ormad, M, P. (2019). *Organic residues as adsorbent for the removal of ciprofloxacin from aqueous solution.*

Pernalete, Z., Piña, F., Suárez, M., Ferrer, A., & Aiello, C. (2008). Fraccionamiento Del Bagazo De Caña De Azúcar Mediante Tratamiento Amoniaco : Efecto De. *Bioagro*, 3–10.

Pintado, E. (2018). *Comparación de la biosorción y desorción de metales pesados mediante el uso de marlo de maíz (Zea mays) en aguas contaminadas.* 121.
Retrieved from <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/16226/1/UPS-CT007883.pdf>

Pinzón, M., & Cardona, M. (2008). Caracterización de la cáscara de naranja para su uso como material bioadsorbente. *Bistua: Revista de La Facultad de Ciencias Básicas*, 57(7), 1–23. Retrieved from <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=90312176003>.

Plaza, J. (2012). *Remoción de metales pesados empleando algas marinas.* 8–9.

Quimica Alkano. (2016). *No Titl*. Retrieved from <http://quimicaalkano.com/product/sulfametoxazol/>

Reinoso, J., Serrano, C., & Orellana, D. (2017). *Contaminantes emergentes y su impacto en la salud.*

Rodriguez, F. (2010). *La Porosidad Como propiedad física: propiedades densidad y porosidad.* 3. Retrieved from http://ocw.uniovi.es/pluginfile.php/4887/mod_resource/content/1/T3b-DensidadPorosidad.pdf

S, V. R. J., & C, C. O. G. (2013). *Predicción de las curvas de ruptura para la remoción de plomo (II) en disolución acuosa sobre carbón activado en una columna empacada Prediction of breakthrough curves for the removal of lead (II) in aqueous solution onto. (li),* 141–158.



- Sadaf, S., & Bhatti, H. N. (2014). Batch and fixed bed column studies for the removal of Indosol Yellow BG dye by peanut husk. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 45(2), 541–553. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2013.05.004>
- Samboni, N., Carvajal, Y., & Escobar, J. C. (2007). *Revisión de parámetros fisicoquímicos como indicadores de calidad y contaminación del agua*.
- Sánchez, J. (2018). *BIOSORCIÓN DE PLOMO Y CADMIO CON LA TUSA DE MAÍZ (Zea mays. L.), EN LAS AGUAS DEL RÍO RÍMAC- ZONA DE CORCONA, HUAROCHIRÍ*.
- Silva, J. (2016). *Biosorción de penicilina g como contaminante emergente con adsorbentes naturales y químicamente modificados*.
- Sotelo, J., Ovejero, G., Delgado, J., & Martínez, I. (n.d.). *Eliminación de compuestos organoclorados para potabilización de aguas*.
- Tejada, C., & Quiñonez, E. (2014). *UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA CONTAMINANTES EMERGENTES EN AGUAS : 80–101*.
- Tian, Yuan; Gao, Bin; Morales, Verónica; Chen, Hao; Wang, Yu; Li, H. (2013). Removal of sulfamethoxazole and sulfapyridine by carbon nanotubes in fixed-bed columns. *Chemosphere*, 90(10), 2597–2605. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2012.11.010>
- Treybal, R. E. (2013). Operaciones de Transferencia de Masa. *Journal of Chemical Information and Modeling*, 53(9), 1689–1699. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Universidad autonoma de Chihuahua. (2014). *ESPECTROMETRÍA VISIBLE Y ULTRAVIOLETA*.
- Vera, L.; Uguña, F.; Vázquez, V.; García, N.; Flores., y M. (2016). *Eliminación de metales pesados de las aguas residuales mineras*.
- Vilardi, G., Di Palma, L., & Verdone, N. (2019). Fixed-bed reactor scale-up and modelling for Cr(VI) removal using nano iron-based coated biomass as packing material. *Chemical Engineering Journal*, 361(December), 990–998. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.12.166>



UNIVERSIDAD DE CUENCA